

Justus-Liebig-Universität Giessen  
Institut für Geographie

in Kooperation mit dem  
Zentrum für Deutsche Luft und Raumfahrt e. V.

## Diplomarbeit

---

### TerraSAR-X basierte Pre- und Post- Disaster Analyse zur Abschätzung vulkanbedingter Landbedeckungsveränderungen Fallbeispiel: Merapi 2010

---



Verfasser: Andre Cahyadi Kalia  
Matrikelnummer: 13009766  
Abgabedatum: 26.4.2011

1. Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Scholz  
2. Gutachter: Dr. Thomas Christiansen

*„To the peaceful application of remote  
sensing in order to maximize the  
scientific, social and commercial benefits  
of this technology for all humankind”*

T. M. Lillesand

# Inhaltsverzeichnis

<i>Erklärung</i> .....	IV
<i>Vorwort</i> .....	V
<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	VI
<i>Tabellenverzeichnis</i> .....	X
<i>Abkürzungsverzeichnis</i> .....	XI
<i>Abstract</i> .....	13
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Satellitengestützte Kriseninformation: Konzepte und Akteure .....	4
1.2. SAR- Bildanalyse: Stand der Forschung .....	9
1.3    Ziel der Arbeit.....	12
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>14</b>
2.1.    Radarfernerkundung.....	14
2.2.    TerraSAR-X .....	24
2.3.    Das Untersuchungsgebiet Merapi .....	27
2.4.    Datenbasis.....	34
2.5.    Vorverarbeitung .....	37
<b>3. Methoden und Ergebnisse</b> .....	<b>41</b>
3.1    Veränderungsdetektion .....	41
3.1.1    Methoden .....	42
3.1.2    Ergebnisse.....	46
3.2    Bildinterpretation.....	51
3.2.1    Methoden .....	51
3.2.2    Ergebnisse.....	53
3.3    Klassifikation der Gefahrenausbildung.....	63
3.3.1    Methoden .....	63
3.3.2    Ergebnisse.....	72

<b>3.4</b>	<b>Schadensabschätzung .....</b>	<b>78</b>
3.4.1	Methoden .....	78
3.4.2	Ergebnisse.....	82
<b>3.5</b>	<b>Radarschatten Analyse .....</b>	<b>85</b>
3.5.1	Methoden .....	85
3.5.2	Ergebnisse.....	87
<b>3.6</b>	<b>Interferometrie.....</b>	<b>88</b>
3.6.1	Methoden .....	88
3.6.2	Ergebnisse.....	91
<b>4.</b>	<b><i>Fazit</i>.....</b>	<b>93</b>
<b>5.</b>	<b><i>Quellenverzeichnis</i> .....</b>	<b>98</b>
5.1	Literatur .....	98
5.2	Web.....	107
5.3	Andere Quellen.....	110
<b>6.</b>	<b><i>Anhang</i>.....</b>	<b>111</b>



## Erklärung

„Ich versichere, dass ich die beiliegende Diplomarbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Gießen, den 26. April 2011

---

Andre Cahyadi Kalia

## Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Zeitraum von November 2010 bis April 2011 beim Zentrum für Deutsche Luft und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen, Deutsches Fernerkundungs Datenzentrum, Abteilung zivile Kriseninformationssysteme und Georisiken. Das Thema der Arbeit ergab sich durch Rücksprache mit Herrn Dipl. Geogr. Hendrik Zwenzner. Es handelt von der Unterstützung des Krisenmanagements von Vulkanausbrüchen durch Nutzung von SAR- Bilddaten.

Ich danke Herrn Zwenzner für die Möglichkeit, die Arbeit beim DLR anzufertigen und dem gesamten ZKI Team, die mich bei der Durchführung der Arbeit mit Rat und Tat unterstützt haben. Insbesondere Herrn Dipl. Geogr. André Twele, Herrn Dr. Sandro Martinis, Frau Dr. Monika Gähler, und Herr Dipl. Geogr. Tobias Schneiderhahn. Anfang April 2011 ist es möglich gewesen, die Ergebnisse dieser Arbeit auf der European Geophysical Union General Assembly in Wien zu präsentieren. So konnten die Erkenntnisse dieser Arbeit der internationalen Forschergemeinde vorgestellt werden und Feedback gesammelt werden. In diesem Zusammenhang möchte ich Dr. Surono vom CVGHM aus Bandung, Herrn Dr. F. Beauducel vom IPDG aus Paris und Herrn Dr. Schneider vom USGS aus Anchorage für interessante Gespräche danken.

Auch möchte ich mich für die wissenschaftliche Betreuung bei Herrn Dipl. Geogr. Hendrik Zwenzner, Herrn. Prof. Dr. em. Ulrich Scholz und Herrn Dr. Thomas Christiansen bedanken.

Stefan Klett, Felix Reinsch, Fritjof Lüthje, Sahra Abdullahi, Max Kapherr und Mathias Rupp möchte ich an dieser Stelle für die stets vorbildliche Hilfsbereitschaft und Kollegialität während der gemeinsamen Zeit beim DLR danken.

Ganz Besonders danke ich meinen Eltern Abdoerrahim und Maria Kalia, meinen Geschwistern Tania Victor und Anette Kalia und meiner Freundin Ina Birk für aufmunternde Worte und inspirierende Gedanken.

Gießen, April 2011

Andre Cahyadi Kalia

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1.1: Nutzeranforderungen zum Krisenmanagement von Vulkanausbrüchen .....	5
Abbildung 1.1.2: CHARTER Aktivierung .....	7
Abbildung 1.1.3 Von der Satellitenbildaufnahme zur Evakuierung .....	8
Abbildung 1.2.1: Kartenprodukt aus Radarsat-2 Daten .....	9
Abbildung 1.2.2: Kartenprodukt aus ALOS-PALSAR Daten.....	11
Abbildung 1.2.3 Deformationsrate 29.10.2009-16.9.2010 am Merapi aufgrund von ALOS-PALSAR.....	12
Abbildung 2.1.1 Das Radarprinzip der Impuls Emission und Echo Imission.....	15
Abbildung 2.1.2: Elektromagnetisches Spektrum, Radarbänder und Atmosphärische Durchlässigkeit .....	16
Abbildung 2.1.3: Die Aufnahmegeometrie eines SAR .....	17
Abbildung 2.1.4 Die Geometrische Verzerrung in Range Richtung durch unterschiedliche Einfallswinkel.....	18
Abbildung 2.1.5: Die geometrischen Verzerrungen layover, foreshortening und shadow .....	19
Abbildung 2.1.6 Effekt der Oberflächenrauigkeit auf das Radarecho.....	20
Abbildung 2.1.7: Reflektionseigenschaften verschiedener Oberflächen .....	22
Abbildung 2.2.1: TerraSAR-X Aufnahmemodi .....	25
Abbildung 2.3.1: Lage des Merapi .....	27
Abbildung 2.3.2: Lage des Untersuchungsgebiet Merapi .....	28
Abbildung 2.3.3:Das Untersuchungsgebiet Merapi .....	29
Abbildung 2.3.4: Karte des indonesischen Subduktionszonen- Systeme .....	30
Abbildung 2.3.5: Pyroklastischer Strom am Merapi 29.10.2010 .....	30
Abbildung 2.3.6: Entfernungen der pyroklastischen Ströme .....	32
Abbildung 2.3.7: Block & Aschestrom am Kali Gendol am 11.11.2010.....	34

Abbildung 2.3.8: Pre- und Post- Desaster Aufnahme am Kali Gendol .....	34
Abbildung 2.3.9: Tote Kuh unter unverbrannter Vegetation .....	34
Abbildung 2.4.1: Datenbasis TerraSAR-X Bildpaare .....	35
Abbildung 2.4.2: TerraSAR-X Footprints.....	35
Abbildung 2.4.3: Datenbasis TerraSAR-X Szenen .....	36
Abbildung 2.5.1: Vergleich von ungefiltertem und Gamma-MAP gefiltertem SAR-Bild.....	38
Abbildung 2.5.2: Methode der Orthorektifizierung, Slant Range Bild & DEM .....	39
Abbildung 2.5.3 Methode der Nearest Neighbor Transformation .....	40
Abbildung 2.5.4: Vergleich SAR Bild ohne Orthorektifizierung und mit Orthorektifizierung .	41
Abbildung 3.1.1: Inputbilder für den Zeitreihen Ansatz .....	43
Abbildung 3.1.2: Inputbilder für den Differenz Ansatz .....	44
Abbildung 3.1.3: Inputbilder für den Ratio Ansatz .....	44
Abbildung 3.1.4: Interferometric Signatures Ansatz .....	46
Abbildung 3.1.5: Ergebnisse der Absolute Differenzberechnung und NCI- Berechnung.....	47
Abbildung 3.1.6: Kohärenz zwischen dem 26.10.2010 bis 6.11.2010 und Isohypsen .....	48
Abbildung 3.1.7: Veränderungsdetektions- Ergebnisse .....	50
Abbildung 3.2.1: SAR-Studie an den Soufrier Hills, Monerrat (WADGE et al. 2011) .....	52
Abbildung 3.2.2: Multitemporales RGB- Komposit Typ Differenz 4.11.2010 & 15.11.2010 am Merapi mit überlagerten Isohypsen .....	54
Abbildung 3.2.3: Multitemporales RGB- Komposit vom Typ Differenz 4.11.2010 & 15.11.2010 .....	55
Abbildung 3.2.4: Bildinterpretation der StripMap Szene vom 6.11.2010.....	58
Abbildung 3.2.5: ASTER basierte Thermale Signatur des Merapi vom 30.9.2010 auf einem ASTER-DEM.....	59
Abbildung 3.2.6: Multitemporales RGB- Komposit vom Typ Differenz 26.10.2010 & 6.11.2010 .....	60

Abbildung 3.2.7: Differenzbild Kali Gendol .....	61
Abbildung 3.2.8: Differenzbid Kali Krasak .....	61
Abbildung 3.2.9: Interferometric Signature 26.10.2010 & 6.11.2010 .....	63
Abbildung 3.3.1: Zusammensetzung des Homogenitätskriterium.....	65
Abbildung 3.3.2: Multiresolution Segmentierung mit verschiedenen Scale Parametern und Segmentgrenzen .....	66
Abbildung 3.3.3: NCI- Berechnung und Objekte mit einem $NCI > 0,1$ bzw. $NCI < - 0,1$ .....	67
Abbildung 3.3.4: Generalisierung der Klassifikation .....	67
Abbildung 3.3.5: Zusammenfassen der Gefahrenbereiche.....	69
Abbildung 3.3.6: Klassifikationsergebnis des Gefahrenbereichs auf der Aufnahme vom 6.11.2010 .....	72
Abbildung 3.3.7: Vergleich TS-X Schrägansicht auf einem SRTM- DEM und optisches Schrägluftbild .....	73
Abbildung 3.3.8: Genauigkeitsabschätzung TerraSAR-X vs. WorldView-2.....	74
Abbildung 3.3.9: Ergebnis der SpotLight Klassifikation und die Lage der Klassifikation auf der SpotLight Szene .....	76
Abbildung 3.3.10: Validierung SpotLight Klassifikation vs. WorldView .....	77
Abbildung 3.4.1: Funktionsweise der Intersect Operation. ....	78
Abbildung 3.4.2: Funktionsweise der calculate area Operation. ....	79
Abbildung 3.4.3: Kompsat- basierte Landbedeckungsklassifikation .....	80
Abbildung 3.4.4: Landbedeckungskarte und Intersect Operation .....	80
Abbildung 3.4.5: BAPPEDA Landnutzungsdaten und Intersect Operation .....	82
Abbildung 3.4.6: Ergebnis der Schadensabschätzung mit Landbedeckungsklassifikation .....	84
Abbildung 3.5.1: Radarschattenmessung zur Bestimmung der Auffüllhöhe .....	85
Abbildung 3.5.2: Position der gemessenen Radarschatten .....	87
Abbildung 3.5.3: Einschränkungen der Radarschattenmessung.....	88

Abbildung 3.6.1: InSAR Geometrie .....	89
Abbildung 3.6.2: Prinzip des Phase unwrapping .....	90
Abbildung 3.6.3: Von der wrapped phase zur unwrapped phase .....	90
Abbildung 3.6.4: TerraSAR-X DEM, Kohärenz 26.10.2010 & 6.11.2010.....	91

Alle abgebildeten Satellitenbilddaten beziehen sich auf eine Projektion in: UTM Zone 49 Süd,  
Datum: WGS 1984.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.11: Todesopfer durch Vulkanausbrüche (Auswahl).....	2
Tabelle 1.12: Lage der Vulkanausbrüche von 1900 bis 2006 .....	3
Tabelle 1.1.1: Charter Mitglieder & Sensoren .....	6
Tabelle 2.2.1: TerraSAR-X Aufnahmemodi .....	25
Tabelle 2.4.1: Ausgewählte Bildeigenschaften der TerraSAR-X Szenen.....	36
Tabelle 3.1.1: Farb Zuweisung und resultierende Farbe für Zeitreihenbilder .....	43
Tabelle 3.1.2: Farb Zuweisung und resultierende Farbe für Differenzbilder .....	43
Tabelle 3.1.3: Farb Zuweisung und resultierende Farbe für Interferometric Signature .....	46
Tabelle 3.3.1: Genauigkeitsabschätzung TSX vs. WV .....	75
Tabelle 3.5.1: Ergebnis der Radarschatten- Analyse .....	87

## Abkürzungsverzeichnis

ASI	Agenzia Spaziale Italiana
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BAPPEDA	Badan Perencanaan Pembangunan Daerah
BNPB	Badan Nasional Penanggulangan Bencana
CHARTER	International Charter for Space and Major Disasters
CNES	Centre national d`études spatiales
CONAE	Argentina`s Comisión Nacional de Actividades Espaciales
CSA	Canadian Space Agency
CVGHM	Center of Volcanology and Geological Hazard Mitigation
DEM	Digital elevation Model
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
DMC	Disaster Monitoring Constellation
DPA	Deutsche Presse Agentur
ESA	European Space Agency
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
InSAR	SAR Interferometry
ISRO	Indian Space Research Organisation
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCI	Normalized Change Index



SAFER	Service Application for Emergency Response
SAR	Synthetic Aperture Radar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TD-X	TanDEM-X
TS-X	TerraSAR-X
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System
ZKI	Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation

## Abstract

This work demonstrates how Synthetic Aperture Radar (SAR) image analysis can successfully be used for supporting disaster and crisis-management concerning volcanic eruptions. In October/November 2010 the strato-volcano Mt. Merapi erupted leading to about 300 deaths and more than 380 000 refugees. Satellite imagery can be a very useful source to derive rapid crisis information for post-disaster relief efforts. Modern, space borne radar sensors like TerraSAR-X can deliver very high resolution remote sensing data, at almost any weather condition, with a fast site access time. Little work has been done in detection of pyroclastic flow deposits by using very high resolution SAR. To increase the knowledge in that issue this work has been realized.

The TerraSAR-X images used in this work were acquired on 26 October 2010 and 6 November 2010 in StripMap Mode with a ground resolution of three meters. Change detection analysis is performed for supporting semi-automated image classification. This is done by using multitemporal color-composites, normalized change and interferometric coherence indices. Subsequently, the disaster extent is mapped by an object-based image analysis, using the software eCognition. Based on the disaster extent map, a damage assessment is performed by an intersection operation which employs governmental land-use maps. Finally, the SAR-based image analysis results are validated with optical imagery. A WorldView image, acquired on 11 November 2010, is used for this reason. The validation shows a close agreement between the SAR and the optical-based disaster extent, concerning the inner part of the pyroclastic flow deposit. The outer part with burnt leaves but still existing tree trunks was well detected by the optical sensor, but poorly with the SAR sensor.

In summary, the presented methods make it possible to rapidly map the disaster extent and to perform a damage assessment in order to assist disaster and crisis-management concerning volcanic eruptions.

### 1. Einleitung

*„A volcano is any place on Earth where magma from the mantle makes its way through the outer crust to the surface“*

(WYLIE 2008: 7)

Jedes Jahr eruptieren etwa 60 der ungefähr 550 weltweit aktiven Vulkane (SCHMINCKE 2010: 193). Die Verschiebung der Erdplatten ist dabei für die geographische Verteilung der Vulkane verantwortlich. Dort wo Erdkruste in den Mantel subduziert wird oder Mantelmaterial aufsteigt, tritt Vulkanismus in Erscheinung (PRESS & SIEVER 2003: 124). Wenn Menschen von vulkanischer Aktivität betroffen werden, kann dies zu verheerenden Vulkankatastrophen führen. Schätzungsweise sind mehr als 220 000 Menschen im Zeitraum von 1783 bis 1997, also in 214 Jahren, durch

vulkanische Aktivität umgekommen (TANGUY et al. 1998: 137). Vulkanische Aktivität kann u.a. Lavaströme, Pyroklastischen Ströme, Ascheregen oder Gesteinsbomben produzieren (siehe Abbildung 1.1). Das vom Vulkan geförderte Material ist hoch variabel und hängt signifikant von Gasgehalt, Viskosität und Zusammensetzung des Magmas ab (PRESS & SIEVER 2003). So hat Asche eine definierte Korngröße < 2 mm während die größten Gesteinsbomben die Größe von

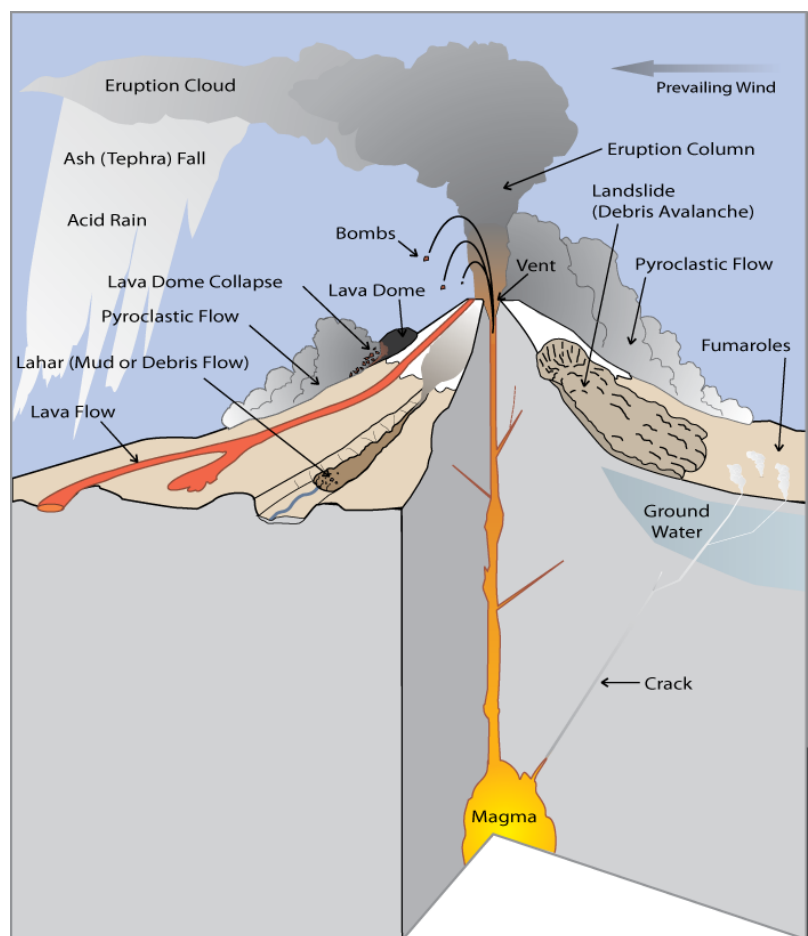


Abbildung 1.1. Schematische Darstellung der Vulkangefahren Quelle: USGS

## 1. Einleitung

Häusern erreichen können (PRESS & SIEVER 2003: 110). Neben den erwähnten Produkten gibt es Prozesse, die mit Vulkanausbrüchen assoziiert sein können. Zu diesen sogenannten Multi-hazards gehören u.a. Schlammströme, Erdrutsche, Erdbeben oder Tsunamis (Wylie 2008: 12). Sowohl primäre Formen vulkanischer Aktivität (Lava etc.) als auch Multi-hazards können zur Gefährdung von Menschenleben führen.

Tabelle 1.1 zeigt eine Auswahl verheerender Vulkanausbrüche seit dem Jahre 1815. So sind am Tambora in Indonesien im Jahr 1815 ca. 12 000, am Krakatau in Indonesien im Jahr 1883 ca. 36 600, am Montagne Pelée auf der Insel Martinique im Jahr 1902 ca. 28 600, am Merapi in Indonesien im Jahr 1930 ca. 1 300 oder am El Chichon in Mexiko im Jahr 1982 ca. 2 000 Menschen umgekommen.

Tabelle 1.11: Todesopfer durch Vulkanausbrüche (Auswahl) Quelle: siehe Tabelle

Jahr	Land	Vulkan	Todesopfer (Ursache)	Quelle
1815	Indonesien	Tambora	12 000 (A, P)	RAFFLES 1817
1883	Indonesien	Krakatau	36 600 (P, T)	VERBECK 1886
1902	Fr. Martinique	Montagne Pelée	28 600 (P)	LACROIX 1904
1930	Indonesien	Merapi	1 300 (P)	VAN BEMMELEN 1949
1982	Mexiko	El Chichon	2 000 (P)	SIGURDSSON et al. 1984
A: Ascheregen; P: Pyroklastischer Strom; T: Tsunami				

Die in Tabelle 1.1 aufgeführten Todesopfer kamen durch Ascheregen, pyroklastische Ströme oder Tsunamis um. Pyroklastische Ströme sind verantwortlich für etwa 27% der Todesfälle nach Vulkanausbrüchen im Zeitraum von 1783 bis 1997. Als häufigste Ursache (30%) geben Tanguy et al. (1998: 142) Krankheiten und Hungersnöte an. Insgesamt gehen sie davon aus, dass in dem oben genannten Zeitraum mindestens 221 907 Menschen direkt oder indirekt durch Vulkanausbrüche ums Leben gekommen sind. Betrachtet man einen kürzeren Zeitraum vom Jahre 1900 bis 2006, also 106 Jahre und schlüsselt die Todesopfer nach ihrer Herkunft auf, so wird deutlich dass die meisten von Vulkanausbrüchen Betroffenen Menschen in Asien leben, während die meisten Todesopfer auf dem amerikanischen Kontinent zu beklagen sind (SALICHON 2007) (siehe Tabelle: 1.2).

Tabelle 1.12: Lage der Vulkanausbrüche von 1900 bis 2006 Quelle: Salichon 2007

Kontinent	Anzahl der Ausbrüche	Todesopfer	Betroffene
Afrika	15	2 213	318 000
Amerika	69	67 841	1 082 150
Asien	80	21 456	2 565 980
Europa	11	783	12 200
Ozeanien	20	3 665	202 391

Es ist anzunehmen, dass die Opferzahlen, bedingt durch Vulkanausbrüche in Zukunft weiter zunehmen werden. Die Autoren TILLING & LIPMANN (1993) sowie DUNKLEY (1999) schätzen, dass heutzutage, weltweit 350 bis über 500 Millionen Menschen in der Nähe von Vulkanen leben und somit dem Risiko zukünftiger Vulkaneruptionen ausgesetzt sind. Ein Grund für die Attraktivität von Vulkangebieten ist die große Fruchtbarkeit vulkanischer Böden, die intensiv landwirtschaftlich genutzt werden können. So kommt es, dass die absoluten Bevölkerungszahlen an einigen Vulkanen besonders stark zunehmen und somit die Opferzahlen nach Vulkanausbrüchen in Zukunft wahrscheinlich erheblich ansteigen werden (SCHMINCKE 2010: 193).

In diesem Zusammenhang ist besonders der in dieser Arbeit betrachtete Vulkan Merapi in Indonesien zu nennen. Dieser hatte im Jahr 1976 in seinem Gefahrenbereich eine absolute Bevölkerungszahl von ca. 206 600 Menschen (SURYO & CLARKE 1989), 19 Jahre später, im Jahr 1995, lebten 1 083 400 Menschen in diesem Bereich (LAVIGNE et al. 2000: 480), was eine Verfünffachung der Bevölkerung in diesem Zeitraum und in diesem Gefahrenbereich bedeutet. Nach einer mündlichen Auskunft von SCHOLZ (2010) lebten im Jahr 2010 ca. zwei Millionen Menschen in der Umgebung des Merapi. Der Merapi gilt als einer der aktivsten und am dichtesten besiedelten Vulkane der Welt und wurde deshalb in den 1990er Jahren von den Vereinten Nationen in die Liste der 16 Hochrisiko Vulkane aufgenommen (ZSCHAU et al. 2001).

Während am Merapi im Jahre 1930 bei einem Ausbruch ca. 1300 Todesopfer zu beklagen waren (VAN BEMMELEN 1949), sind es im Jahre 2010 „nur“ ca. 300 Menschen, bei einer ungleich höheren vulkanischen Aktivität und ebenfalls ungleich höherer Bevölkerungsanzahl im Jahre 2010 (Jousset 2010: 1). Dieser Umstand ist unter anderem auf die mit 380 000

evakuierten Menschen bisher größte Evakuierungsaktion in Folge einer Vulkaneruption zurückzuführen (JOUSSET 2010: 4). Durch die Erfahrung des indonesischen *Center of Volcanology and Geological Hazard Mitigation (CVGHM)* im Katastrophenmanagement von Vulkanausbrüchen und die Nutzung moderner Techniken war die Merapi 2010 Eruption einer der Ausbrüche mit dem besten Katastrophen-Management überhaupt (JOUSSET 2010: 4). Das *CVGHM* nutzte dabei u.a. seismische Daten in Kombination mit Fernerkundungsdaten um Warnungen auszugeben bzw. Evakuierungen einzuleiten und konnte so mehrere tausend Menschen schützen (SURONO et al. 2011, SCHNEIDER et al. 2011).

### 1.1. Satellitengestützte Kriseninformation: Konzepte und Akteure

Um Fernerkundungsdaten zu erhalten, aktivierte das *CVGHM* mehrere internationale Projekte. Es wurden unter anderem die Projekte *CHARTER (International Charter for Space and Major Disasters)* und *SAFER (Service Application for Emergency Response)* aktiviert (SCHNEIDER 2011, BIGNAMI 2011). Bei *CHARTER* und *SAFER* handelt es sich um Projekte mit dem Ziel, das Management von Katastrophen zu unterstützen. Dies geschieht indem sie den sogenannten Nutzern (z.B. Katastrophenschutz, Hilfsorganisationen, politische Entscheidungsträger, lokale Bevölkerung etc.) Fernerkundungsdaten, bzw. weiterverarbeitete Kriseninformationen kostenfrei liefern. Dabei liegen sowohl Naturkatastrophen (Stürme, Hochwasser, Tsunamis, Erdbeben, Vulkanausbrüche etc.) als auch anthropogen verursachte Katastrophen (Flüchtlingscamps, Nuklear-Reaktor Unfälle, etc.) im Fokus. Finanziert wird bspw. die *CHARTER* durch die Europäische Union innerhalb des 7th. Research and Development Framework Program: Global Monitoring for Environment and Security (GMES). Die Quelle der Kriseninformationen besteht neben aktuellen und archivierten Fernerkundungsdaten z.B. auch aus GIS Daten. Das Katastrophenmanagement in diesem Falle von einem Vulkanausbruch, lässt sich in mindestens drei verschiedene Phasen gliedern. Diese umfassen Vorbereitung, Bewältigung und Wiederaufbau (siehe Abbildung 1.1.1) (JOYCE et al. 2009a: 319). Zur Vorbereitungs-Phase gehören die Gefahreneinschätzung, die Vulnerabilitätsanalyse sowie die Frühwarnung vor einem potentiellen Vulkanausbruch. Diese Aktivitäten zielen darauf ab das Risiko, durch einen Vulkanausbruch zu Schaden zu kommen, zu minimieren. Das Ziel der Bewältigungs-Phase ist es, die Folgen eines Vulkanausbruchs durch das effektive Management der Ressourcen so schnell wie möglich zu überwinden. So sollen z.B. Rettungseinsätze und

Hilfsanstrengungen effektiv koordiniert werden (QUARANTELLI 1997). In der Wiederaufbau-Phase soll dieser effektiv koordiniert werden, um möglichst schnell zu einer Situation vergleichbar mit derjenigen vor dem Vulkanausbruch zu gelangen. Einige Nutzeranforderungen zum Krisenmanagement von Vulkanausbrüchen sind in Abbildung 1.1.1 abgebildet. Sie umfassen bspw. die Kartierung der Gefahrenausdehnung (Hazard Extent) oder Informationen über topographische Veränderungen. Die gelb hinterlegten Begriffe werden in dieser Arbeit behandelt (siehe Kapitel 1.3).

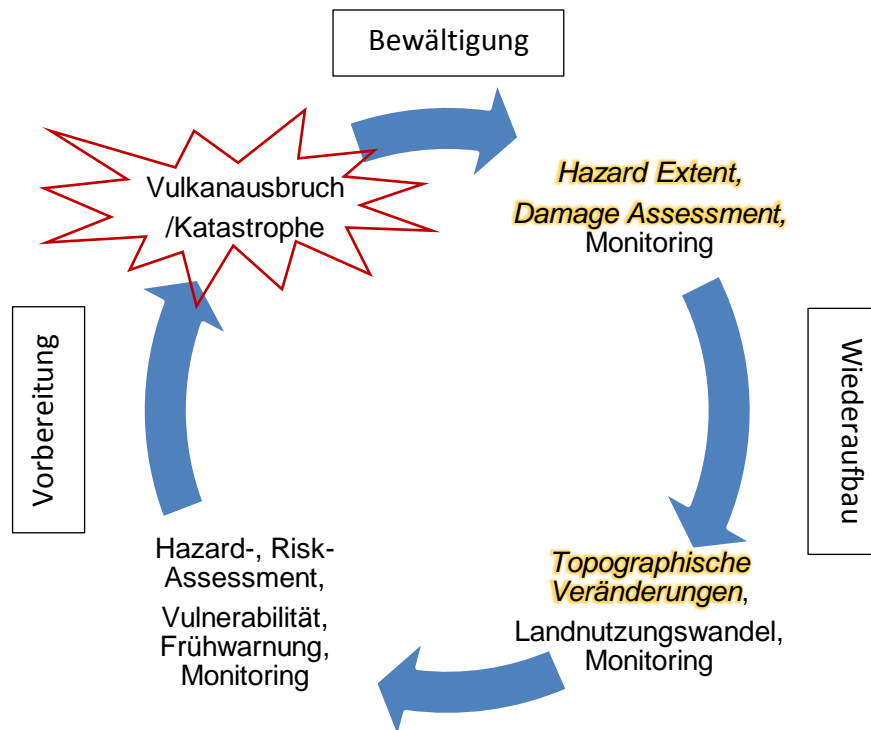


Abbildung 1.1.1: Nutzeranforderungen zum Krisenmanagement von Vulkanausbrüchen

Quelle: verändert nach ZKI, JOYCE et al. 2009

Um das Katastrophenmanagement in den erwähnten Phasen mit Analysen zu unterstützen haben sich satellitengestützte Kriseninformationen etabliert, da sie flächendeckend und zeitnah Auskünfte über die Erdoberfläche liefern können (GÄHLER et al. 2008: 24ff). Da kein Satellitenbetreiber diese umfangreiche Aufgabe für alle Erdteile alleine lösen kann, haben sich verschiedene Satellitenbetreiber in Projekten wie der CHARTER, SAFER oder SENTINEL ASIA zusammengeschlossen. Diejenigen, die in der CHARTER zusammengeschlossen sind, zeigt Tabelle 1.1.1.

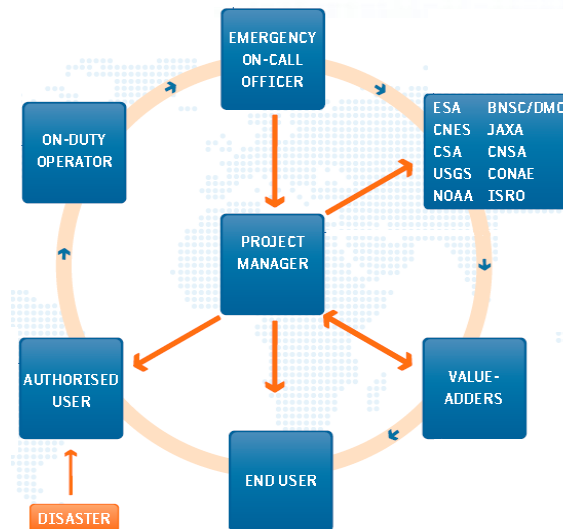
Tabelle 1.1.1: Charter Mitglieder &amp; Sensoren (SAR- Sensoren: grau hinterlegt)

Quelle: verändert nach BÜHLER et al. 2007

Organisation	Satellit
European Space Agency ESA	ERS
	ENVISAT
Centre national d`études spatiales CNES	SPOT
German Aerospace Center DLR	TerraSAR-X
Italian Aerospace Centre ASI	COSMO-SKYMED
Disaster Monitoring Constellation DMC	ALSAT
	NigeriaSat
	BILSAT-1
National Aeronautics and Space Administration NASA	ASTER
	TERRA
	AQUA
National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA	POES
	GOES
United States Geological Survey USGS	LANDSAT
Canadian Space Agency CSA	RADARSAT 2
Digital Globe - kommerziell Vertrag mit CNES und USGS	QuickBird
	WorldView
	Kompsat 2
GeoEye - kommerziell Vertrag mit CNES und USGS	IKONOS
Japan Aerospace Exploration Agency JAXA	ALOS PALSAR
Indian Space Research Organisation ISRO	IRS
China National Space Administration	Beijing-1
National Space Organization of Taiwan	Formosat
Argentina`s Comisiòn Nacional de Actividades Espaciales CONAE	SAC-C
Chinese/Brazilian	CBERS

Wie eine Aktivierung der CHARTER abläuft ist in Abbildung 1.1.2 dargestellt: Nach einer Katastrophe sendet ein autorisierter Nutzer (z.B. CVGHM) eine Anfrage bzgl. satellitengestützter Kriseninformationen an den *On-Duty Operator*, dieser überprüft die Identität des autorisierten Nutzers und leitet ggf. die Anfrage weiter an den *Emergency On-Call Officer*. Der *Emergency On-Call Officer* analysiert die Anfrage und identifiziert die dafür geeignetsten Satellitensensoren. Weiterhin kontaktiert er den *Project Manager* und die beteiligten Weltraumagenturen. Der *Project Manager* koordiniert die Datenakquisition in Absprache mit dem autorisierten Nutzer und beauftragt die Weltraumagenturen, die





Insgesamt ist die CHARTER seit ihrer Gründung im Jahr 1999 über 170 Mal aktiv geworden. Die häufigsten Naturkatastrophen waren dabei Überflutungen (51%) und Erdbeben (18%). Vulkanausbrüche waren in 7% der Fälle die Ursache für eine Aktivierung (CHARTER 2010). Im Fall des Vulkanausbruchs am Merapi am 26. Oktober 2010 wurde die CHARTER offiziell am 3. November 2010 durch das *USGS (United States Geological Survey)* im Auftrag des *CVGHM* aktiviert. Für das *Project Management* war das *VDAP (Volcano Disaster Assistance Program)* des *USGS* verantwortlich. Es kamen dabei u.a. optische Sensoren (*GeoEye 1, WorldView 2*), Sensoren des thermalen Infrarots (*ASTER*) und *SAR (Synthetic Aperture Radar)* Sensoren (*TerraSAR-X, COSMO-Sky Med, Radarsat 2*) zum Einsatz (SCHNEIDER 2011, BIGNAMI 2011). Es lieferte bspw. die deutsche Raumfahrtagentur DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) TerraSAR-X Daten, die italienische ASI (Agenzia Spaziale Italiana) COSMO-SKY Med Daten, die kanadische CSA (Canadian Space Agency) Radarsat 2 Daten oder die amerikanische NASA (National Aeronautics and Space Administration) ASTER Daten.

7

wertvolle Aussagen über den Zustand der vulkanischen Aktivität (z.B. Gipfelmorphologie) oder die Ausdehnung des Gefahrenbereichs (z.B. Ablagerungen pyroklastischer Ströme) (SCHNEIDER et al. 2011).

Im Fall des Merapi dauerte es maximal zwölf Stunden von der Aufnahme der Fernerkundungsdaten bis zur Auslieferung der Kriseninformationen (siehe Abbildung 1.1.3): Die Fernerkundungsdaten (TerraSAR-X, Radarsat-2, u.a.) waren nach ihrer Aufnahme binnen zwei bis sechs Stunden bei den Vulkanologen des *USGS Alaska and Cascades Volcano Observatory*. Bis die extrahierte Kriseninformation von dort beim indonesischen *CVGHM* war, dauerte es wiederum nur zwischen zwei und sechs Stunden (SCHNEIDER et al. 2011).

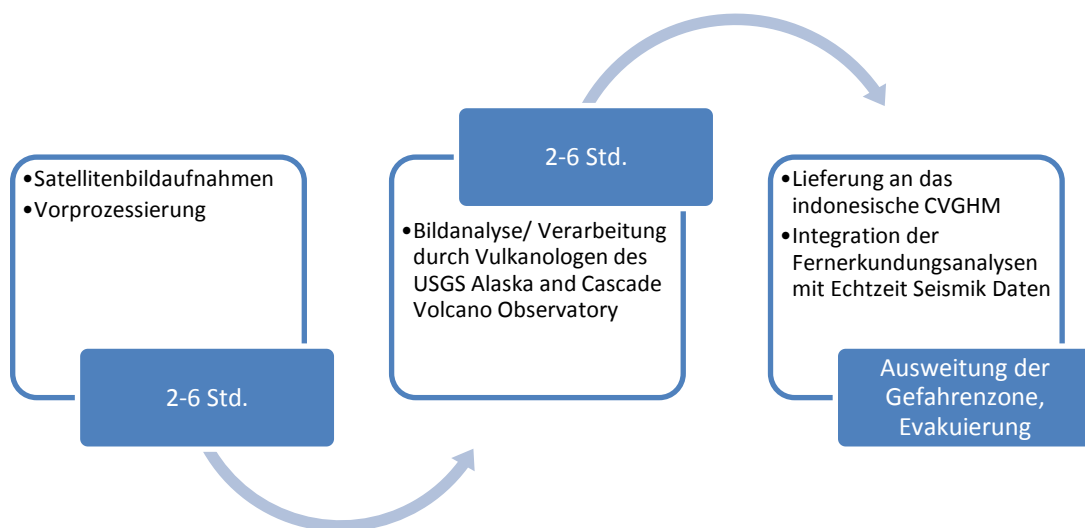


Abbildung 1.1.3 Von der Satellitenbildaufnahme zur Evakuierung

Quelle: verändert nach SCHNEIDER et al. 2011

Die häufige Wolkenbedeckung sowie vulkanische Asche, Gas- und Wasserdampfemissionen verhinderten jedoch die meiste Zeit der Eruption die erfolgreiche Erdbeobachtung mittels optischer Sensoren. Ein bedeutender Unterschied von SAR- zu optischen Sensoren ist darin begründet, weitestgehend unabhängig von atmosphärischen Prozessen und tageszeitlichen Lichtverhältnissen verwertbare Aufnahmen tätigen zu können (BIGNAMI et al. 2011, SCHNEIDER et al. 2011). Diese Allwetter, Tag & Nacht Nutzbarkeit in Kombination mit einer schnellen *Site Access Time* (maximaler Zeitraum bis ein beliebiger Punkt der Erdoberfläche abgebildet werden kann) und hoher geometrischer machen SAR- zu einer Alternative falls optische Systemen die Erdoberfläche nicht abbilden können. Dies ist besonders bedeutsam im Kontext der Kriseninformationen, denn es handelt sich bei dieser Anwendung um einen sehr

## 1. Einleitung

zeitkritischen Vorgang. Einige Stunden Differenz können für die betroffenen Menschen einen entscheidenden Unterschied bedeuten. Dies bestätigte sich auch beim Merapi Ausbruch im Jahre 2010, bei dem u.a. durch die Kriseninformationen aus SAR- Aufnahmen die lokale Bevölkerung einige Stunden vor dem Vulkanausbruch am 5.11.2010 zur Evakuierung aufgefordert werden konnte (mündliche Aussage von Dr. Surono, Leiter des CVGHM).

### 1.2. SAR- Bildanalyse: Stand der Forschung

Erst die technologische Weiterentwicklung in den letzten Jahren hat dazu geführt, nutzbare Kriseninformationen mit SAR- Sensoren generieren zu können (VOIGT et al. 2007: 1520). So erreichen die modernen Sensoren des TerraSAR-X oder des COSMO-Sky Med im Jahr 2010 eine geometrische Auflösung von bis zu einem Meter (FRITZ & EINEDER 2010: 18, ASI 2010). So konnte die Größe des Vulkandoms durch Interpretation sehr hoch auflösender SAR- Bilddaten während der eruptiven Phase des Merapi im Jahr 2010 abgeschätzt werden.

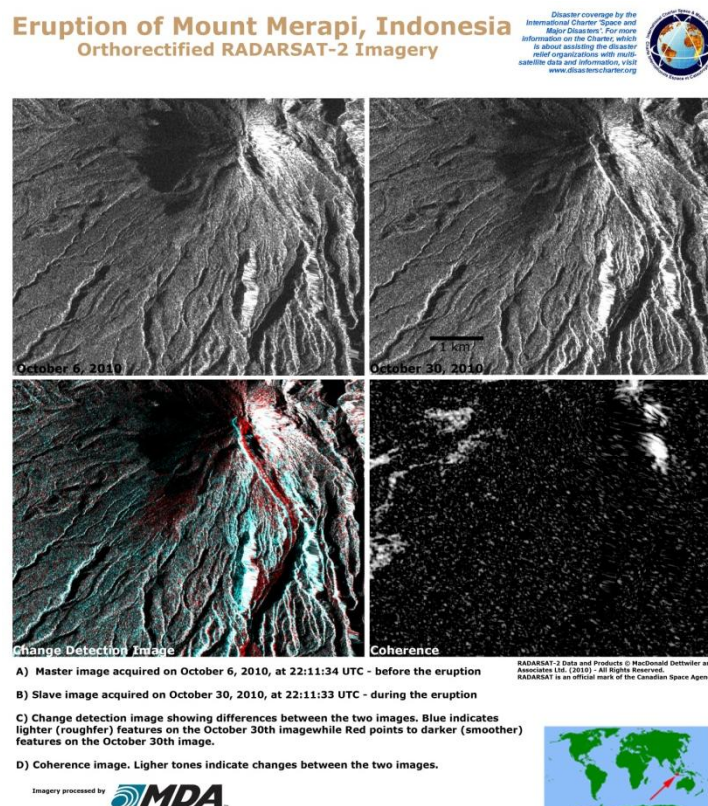


Abbildung 1.2.1: Kartenprodukt aus Radarsat-2 Daten Quelle: Charter 2010

Zur Gewinnung von Kriseninformation wird neben der Bildinterpretation auch die Veränderungsdetektion genutzt. Dabei lassen sich zwei Ansätze unterscheiden: Zum einen

die so genannte Amplituden-Veränderungs-Detektion (*amplitude change detection, ACD*) und zum anderen die Kohärenz-Veränderungs-Detektion (*coherence change detection, CCD*). Bei der ACD werden die Veränderungen der Erdoberfläche durch multitemporalen Vergleich der Mikrowellenamplitude sichtbar. Die CCD hingegen basiert auf einem Vergleich der Mikrowellen-Phase durch Nutzung der Kohärenz (SCHLEUHL et al. 2009: 7463).

Um Veränderungen der Erdoberfläche mittels ACD sichtbar zu machen, werden u.a. folgende Techniken eingesetzt: Differenz- (WADGE et al. 2011, TERUNUMA et al. 2009), Ratio- (WADGE et al. 2002) oder Zeitserien- (WADGE & HAYNE 1998) Bildung. Die ACD nutzt die zeitliche Änderung der Rückstrahlungsstärke aus um Veränderungen erkennbar zu machen. So kann eine Änderung der Oberflächenrauigkeit durch vulkanische Ablagerungen sichtbar gemacht werden (JOYCE et al. 2009: 192). Daher konnte WADGE (2011), mit dem Fernerkundungssatellit TerraSAR-X unter Nutzung der Differenzbildung, erfolgreich vulkanische Ablagerungen an den Soufriere Hills (Montserrat) detektieren. Die Zeitserien-Methode wird bereits operationell als Kriseninformationsprodukt nach Vulkanausbrüchen genutzt (siehe Abbildung 1.2.1 unten links und 1.2.2 unten): Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen SAR-Amplituden-Bilder werden durch verschiedene Farben in einen RGB-Komposit dargestellt um zeitliche Amplitudenveränderungen sichtbar zu machen (SCHLEUHL et al. 2009: 7463).

Die CCD beruht auf der Auswertung der Kohärenz zwischen zwei zeitlich auseinanderliegenden SAR-Aufnahmen. Deshalb kann sie genutzt werden um Veränderungsbereiche sichtbar zu machen (SCHLEUHL et al. 2009: 7463). Durch Verwendung dieser Technik konnten TERUNUMA et al. (2005) mit den Fernerkundungssatelliten ERS 1 und JERS 1 vulkanische Ablagerungen am Unzen (Japan) sichtbar machen. Jedoch ist die Verwendung von CCD nur in Gebieten mit hoher Kohärenz möglich (JOYCE et al. 2009: 192). Dies bedeutet, dass es in dem Untersuchungsgebiet keine, oder nur geringe, Vegetationsbedeckung gibt, es nicht von Schnee bedeckt sein darf und keine großen Erosionsraten aufweisen darf (JOYCE et al. 2009: 192).



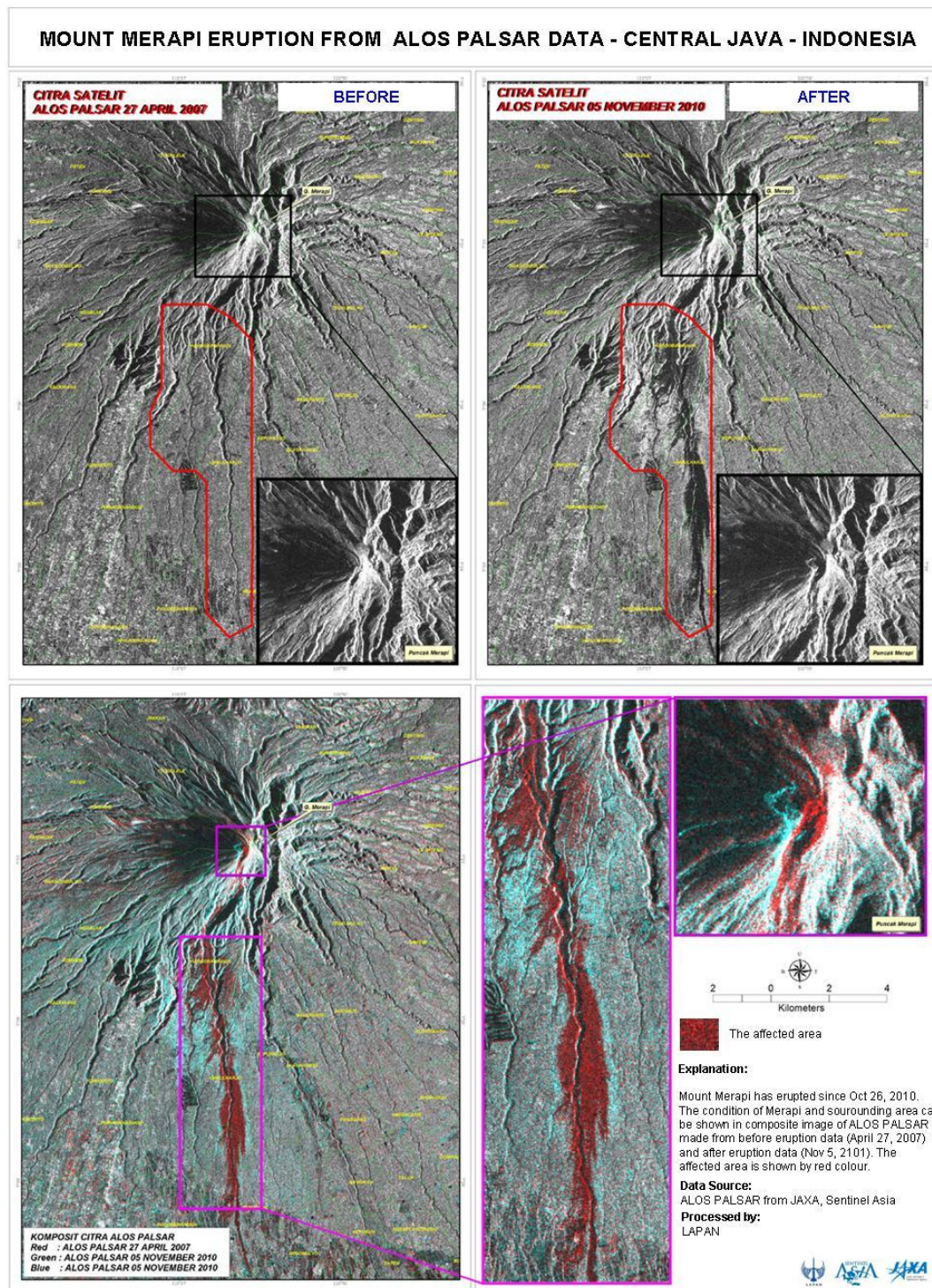


Abbildung 1.2.2: Kartenprodukt aus ALOS-PALSAR Daten Quelle: SENTINEL 2010

### *SAR- Interferometrie*

Um flächendeckende Veränderungen der Vulkanmorphologie mit SAR zu detektieren, wird auf Basis der SAR- Interferometrie ein Pre- und ein Post- Disaster Höhenmodell erstellt und anschließend ihre Differenz berechnet (Joyce 2009:192). Alternativ können sehr kleine

Höhenveränderungen durch Verwendung der differentiellen Interferometrie gemessen werden. Diese Hebungs-/Senkungsdaten mit sub-zentimeter Genauigkeit konnten in Einzelfällen dazu dienen, einen Vulkanausbruch bis auf wenige Tage Genauigkeit vorherzusagen (JOYCE et al. 2009: 192, SCHMINCKE 2010: 204). MASSONET et al. (1995) gehörten zu den Ersten, die vulkanische Deformationen mit dieser Methode maßen. Am Merapi wurden solche Bodendeformationen zwischen dem 29.10.2009 und dem 16.9.2010 durch den Fernerkundungssatelliten ALOS-PALSAR gemessen (siehe Abbildung 1.2.3).

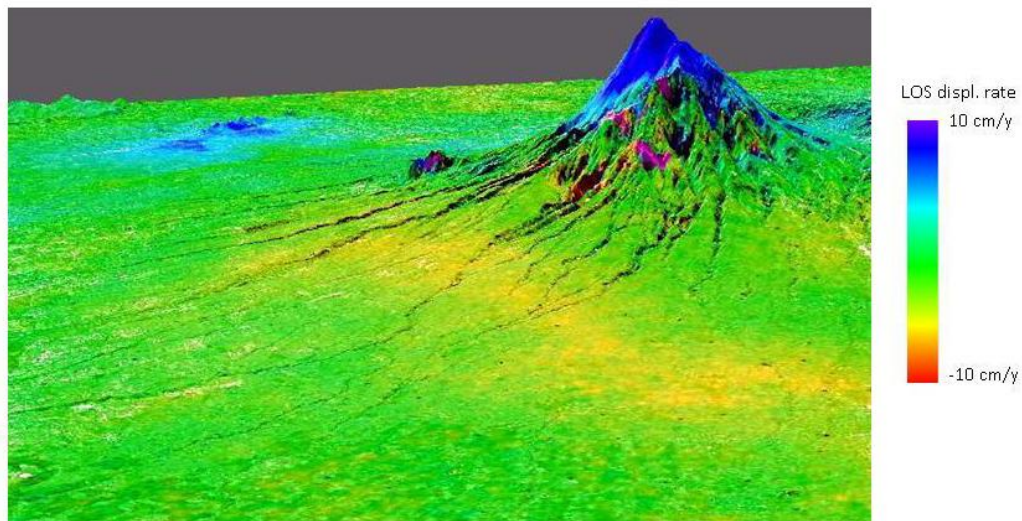


Abbildung 1.2.3: Deformationsrate 29.10.2009-16.9.2010 am Merapi gemessen mit ALOS-PALSAR (Blickrichtung NW) Quelle: SAFER

### 1.3 Ziel der Arbeit

Aufgrund der beschriebenen SAR- spezifischen Allwetter, Tag & Nacht Einsatzfähigkeit ist die SAR- Technologie besonders im zeitkritischen Krisenfall als Alternative zu optischen, thermalen Sensoren von Bedeutung. Da es sich beim satellitengestützten SAR mit sehr hochauflösender geometrischer Auflösung um eine relativ neue Technologie handelt, sind die Möglichkeiten und Machbarkeiten dieser Technologie noch nicht umfassend erforscht. Ob, bzw. wie die SAR- Technologie zur Beobachtung vulkanbedingter Landbedeckungsveränderungen geeignet ist, wird in dieser Arbeit behandelt.

**Ziel dieser Arbeit ist es, Möglichkeiten zur Unterstützung des Krisenmanagements von Vulkanausbrüchen durch Extraktion von Kriseninformationen aus SAR- Fernerkundungsdaten aufzuzeigen.**

Dabei sollen verschiedene Methoden aufgezeigt werden, wie es möglich ist, aus SAR- Bilddaten Kriseninformationen zu extrahieren. Die dabei angewendeten Methoden umfassen:

- Veränderungsdetektion (Kapitel 3.1)
- Bildinterpretation (Kapitel 3.2)
- Bild Klassifikation (Kapitel 3.3)
- GIS-Analyse (Kapitel 3.4)
- Schattenlängenmessung (Kapitel 3.5)
- Interferometrie (Kapitel 3.6)

In Kapitel 3.1 bis 3.3 wird eine Veränderungsdetektion, Bildinterpretation und Klassifikation des Gefahrenbereichs ausgeführt. Anschließend wird in Kapitel 3.4 eine Schadenseinschätzung durchgeführt. Daraufhin wird in Kapitel 3.5 und 3.6 auf topographische Veränderungen eingegangen.

Neben den in dieser Arbeit behandelten Kriseninformationen zur Unterstützung des Krisenmanagements von Vulkanausbrüchen gibt es z.B. noch das Vulkanmonitoring, Landnutzungswandel-, Vulnerabilitäts- oder Risiko- Analysen (siehe Abbildung 1.1.1). Auf diese sei hier nur verwiesen, da sie in dieser Arbeit nicht behandelt werden.



## 2. Grundlagen

Im Kapitel Grundlagen werden wichtige Eigenschaften der Radarfernerkundung insbesondere mit TerraSAR-X erläutert. Weiterhin wird das Untersuchungsgebiet und die Datenbasis vorgestellt. Abschließend werden Vorverarbeitung-Schritte vorgestellt.

### 2.1.Radarfernerkundung

RADAR ist eine Abkürzung für Radio Detection and Ranging (HENDERSON & LEWIS 1998: 2). Innerhalb der Fernerkundung wird hauptsächlich das bildgebende Radar verwendet, man spricht im englischen auch von *imaging radar*. Es gehört zu den relativ neuen Fernerkundungssystemen im Vergleich zur Luftbildfotographie. Beachtenswert ist, dass das bildgebende radar erst seit den 1960er Jahren im Bereich der Geowissenschaften verwendet wird, die ersten Experimente allerdings schon Ende des 19. Jahrhundert von Heinrich Hertz (1857 – 1894) durchgeführt wurden. Dieser zeigte, dass Radiowellen von metallischen und nicht metallischen Objekten reflektiert werden (ULABY et al. 1986). Das *imaging radar* wird in der Fernerkundung zur Erdbeobachtung genutzt und zählt zu den aktiven Systemen, weil die gemessene Elektromagnetische Strahlung von der Aufnahmeplattform selbst erzeugt wird (ALBERTZ 2001: 56). Durch diese Eigenschaft ist das Radar unabhängig von der Sonnenbeleuchtung und kann tags und nachts zur Erdbeobachtung eingesetzt werden. Der Kern eines Radars besteht aus einer sendenden und einer empfangenden Antenne. Sind diese an der gleichen Position spricht man von einer monostatischen Konfiguration andernfalls von einer bistatischen Konfiguration (HENDERSON & LEWIS 1998: 9). Um ein zweidimensionales Bild der Erdoberfläche zu erhalten wird folgendes Prinzip genutzt: Das Radar generiert einen Elektromagnetischen Impuls welcher von der Senderantenne, in Keulenform, ausgestrahlt wird und „beleuchtet“ so einen Bereich der Erdoberfläche. Ein Teil der gesendeten Strahlung wird daraufhin zurück zum Radar reflektiert (Radarecho) und dort von der Empfängerantenne gemessen (siehe Abbildung 2.1.1). Anschließend wird der gemessene Impuls gespeichert und zu einem zweidimensionalen Bild weiterverarbeitet (HENDERSON & LEWIS 1998: 15).



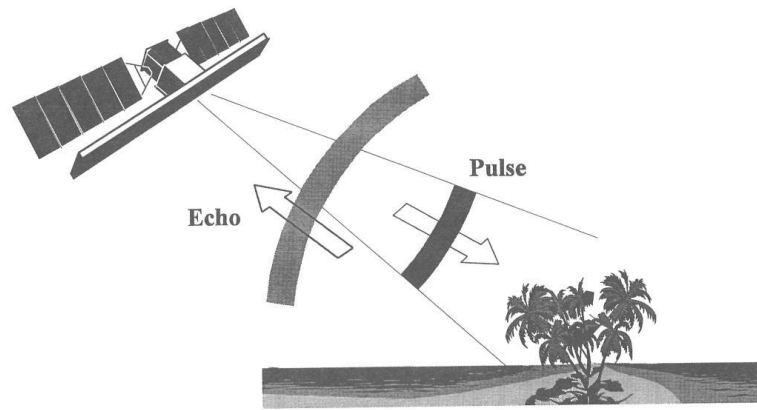


Abbildung 2.1.1 Das Radarprinzip der Impuls Emission und Echo Imission

Quelle: HENDERSON & LEWIS 1998: 15

Der beschriebene Aufnahmeprozess kann unter Verwendung einer realen Antenne oder einer künstlich verlängerten Antenne erfolgen. Im ersten Fall spricht man von Radar mit realer Apertur (*real aperture radar*, RAR), im zweiten Fall von einem Radar mit synthetischer Apertur (*synthetic aperture radar*, SAR). Der Vorteil von SAR, im Vergleich zu RAR, ist die Möglichkeit die Erdoberfläche aus großer Höhe mit hoher räumlicher Auflösung unter Verwendung einer relativ kurzen Antenne abzubilden. Dies ist machbar weil aus vielen sich überlappenden Aufnahmen durch mathematische, bzw. elektronische Operationen unter Berücksichtigung des Doppler Prinzips ein einziges zweidimensionales Bild erzeugt wird. Die mathematischen Operationen werden von ELACHI (1987) im Detail beschrieben und basieren u.a. auf den Arbeiten von SHERWIN et al. (1962). Weil Satelliten die Erdoberfläche aus großen Höhen abbilden und die Antennenlänge begrenzt ist, wird bei Ihnen ausschließlich die SAR Technologie zur Radarfernerkundung verwendet. Weil SAR ein aktives Fernerkundungssystem ist, ist die Wellenlänge und Polarisation der emittierten Elektromagnetischen Strahlung über die gesamte Szene bekannt und verhält sich konstant (HENDERSON & LEWIS 1998: 9). Zu beachten ist, dass nur eine spezifische Wellenlänge pro Radarsensor verwendet wird, im Gegensatz zu optischen Sensoren, die mehrere Wellenlängenbereiche detektieren können. In der Radarfernerkundung liegt die genutzte Wellenlänge im Mikrowellenbereich, d.h. in einem Bereich des Elektromagnetischen Spektrums von 1 mm bis 1 m Wellenlänge (siehe Abbildung 2.1.2). Neben der groben Unterscheidung zwischen Mikrowellen, Infrarot und Sichtbaren Bereich des Elektromagnetischen Spektrums wird der Mikrowellenbereich außerdem in feinere Abschnitte, sogenannte Mikrowellen Bänder, unterteilt.

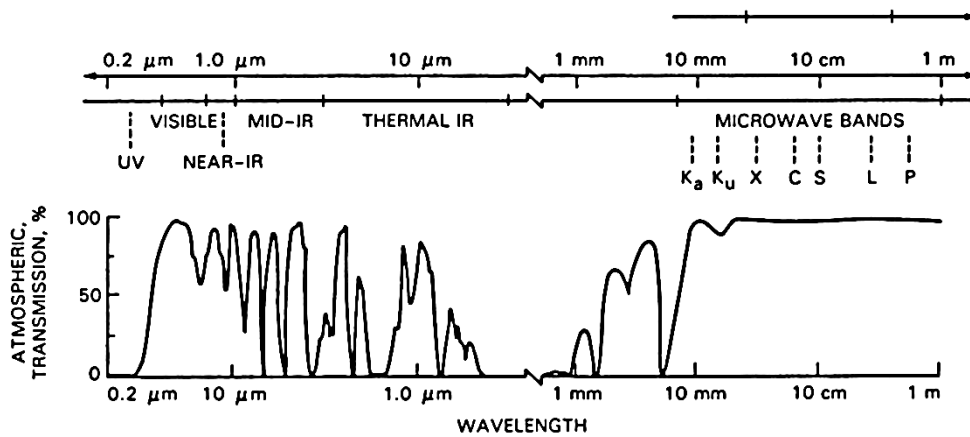


Abbildung 2.1.2: Elektromagnetisches Spektrum, Radarbänder und Atmosphärische Durchlässigkeit Quelle: NASA 1989

Dazu wurden die Buchstaben K, X, C, S, L und P verwendet (siehe Abbildung 2.1.2). Jedes Band zeichnet sich durch einen bestimmten Wellenlängenbereich aus und besitzt daher Wellenlängen-typische Eigenschaften. So ist die Atmosphäre für Wellenlängen, die länger sind als vier Zentimeter, transparent. Dies führt dazu, dass Radarsysteme, deren Wellenlängen mehr als 4 cm beträgt, unabhängig vom Wetter arbeiten können. Das X-Band ( $\lambda = 3$  cm) hingegen kann zwar auch Rauch, Dunst oder Wolken durchdringen, wird aber von Regentropfen oder Hagel beeinflusst (LILLESAND & KIEFER 2000: 638, ELACHI 1987, DANKLMAYR et al. 2009). Neben der Durchlässigkeit hinsichtlich der Atmosphäre können Mikrowellen im L-Band Baumkronen passieren, während Mikrowellen im X-Band dies nicht können. Diese werden bereits im oberen Bereich der Baumkronen reflektiert. Daraus folgt eine unterschiedliche Interaktion mit der Erdoberfläche je nach Mikrowellenband.

Während die Wellenlänge konstant bleibt kann die Polarisation, d.h. die Ausrichtung der Elektromagnetischen Welle, vor jeder Bild- Aufnahme eingestellt werden. Die Polarisation gibt die Richtung des elektrischen Felds in einer elektromagnetischen Welle wieder und wird von der Antenne gesteuert (Henderson & Lewis 1998: 820). Die Polarisation kann horizontal (H) oder vertikal (V) erfolgen, sie kann gleichpolarisiert als auch kreuzpolarisiert sein. Wenn beim Empfang die gleiche Polarisation wie beim Senden verwendet wird, spricht man von Gleichpolarisation, andernfalls von Kreuzpolarisation. Es ergeben sich daraus folgende Möglichkeiten:

- Gleichpolarisiert: HH oder VV und
- Kreuzpolarisiert: HV oder VH.

Grundsätzlich ist das Radarecho dann besonders hoch wenn die verwendete Polarisation und das beleuchtete Objekt die gleiche Richtung aufweisen (z.B. vertikale Polarisation und vertikale Halme eines Weizenfelds) (ESCH 2006: 27). Durch gezielte Verwendung verschiedener Wellenlängen und Polarisationen lassen sich bestimmte Oberflächen besonders gut zu erkennen (KERLE et al. 2004: 218). Die Möglichkeiten verschiedener Polarisationen zur Detektion von Lava werden von SCHABER et al. (1980), NASA (1986 & 1989) und CAMPBELL et al. (1989) beschrieben.

Neben den Unterschieden hinsichtlich Wellenlänge und Polarisation ist auch die Bildgeometrie anders als bei optischen Aufnahmen. Sie resultiert aus der Radar-typischen Schrägsicht (siehe Abbildung 2.1.3). Eine der Ursachen für die Schrägsicht, liegt in der Tatsache, dass zur Lokalisation des empfangenen Radarechos auf dem SAR-Bild eine Entfernung (quer zur Flugrichtung) und ein Winkel (in Flugrichtung) gemessen werden. Würde ein Radarsensor nicht in Schrägsicht aufnehmen, wäre keine eindeutige räumliche Zuweisung des empfangenen Radarechos über die Entfernung mehr möglich, weil links und rechts des Nadir (Punkt auf der Erdoberfläche der senkrecht zum Projektionszentrum liegt) gleiche Entfernungen für Objekte links und rechts der Flugrichtung existieren (BAMLER & SCHÄTTLER 1993). Bei optischen Sensoren hingegen werden zwei Winkel gemessen.

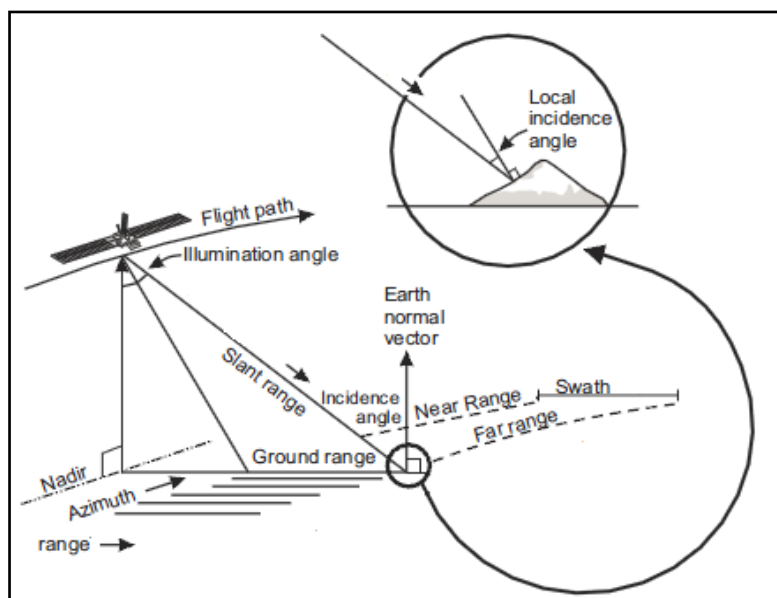


Abbildung 2.1.3: Die Aufnahmegeometrie eines SAR Quelle: KERLE et al. 2004

Um die geometrischen Eigenschaften einer Radaraufnahme zu erörtern folgt zunächst eine Erklärung der Begrifflichkeiten. Den Weg der Mikrowellen vom Sender zur Erdoberfläche nennt man **slant range**. Die entsprechende Strecke auf der Erdoberfläche heißt **ground**

**range**. Die Richtung senkrecht zur Flugrichtung wird als **range** bezeichnet, die Richtung parallel zur Flugrichtung nennt man **azimuth**. Die abgebildete Erdoberfläche wird Schwad (**swath**) genannt, dieser wird weiter in **near range** und **far range** aufgeteilt. Near range bezeichnet die Bereiche in der Nähe der Aufnahmeplattform, far range hingegen jene fern der Aufnahmeplattform. Der Winkel mit dem die Mikrowellenstrahlen den Sender verlassen nennt man Beleuchtungswinkel (illumination angle). Den Winkel mit dem die Strahlung auf die Erdoberfläche auftrifft **Einfallswinkel** (incidence angle), bzw. **lokaler Einfallswinkel** (local incidence angle). Beim Einfallswinkel geht man von einer ebenen Erdoberfläche aus, der lokale Einfallswinkel meint den Winkel der Strahlung in Bezug auf die lokale Hangneigung.

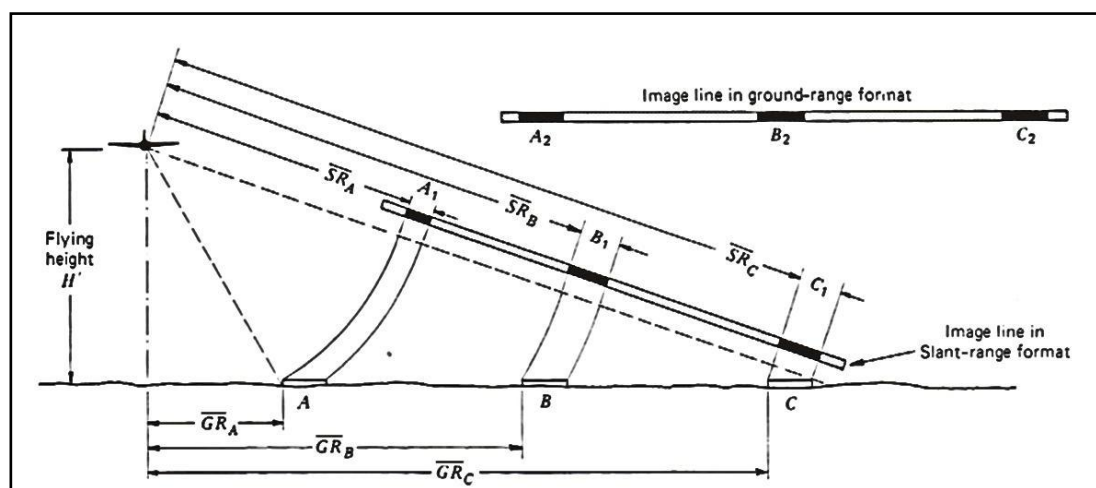


Abbildung 2.1.4 Die Geometrische Verzerrung in Range Richtung durch unterschiedliche Einfallswinkel Quelle: SABINS 1997

Die geometrische Auflösung ist in range Richtung von anderen Parametern abhängig als in azimuth Richtung. In ground range Richtung ist sie von der Impuls Länge und dem Beleuchtungswinkel der emittierten Mikrowellenstrahlung abhängig. Dies hat zur Folge dass die geometrische Auflösung in ground range Richtung entfernungsabhängig wird, sodass gleiche Bodendistanzen in der slant range Darstellung zum Nadir hin zunehmend gestaucht abgebildet werden (LILLESAND & KIEFER 2000: 631, ESCH 2006: 24) (siehe Abbildung 2.1.4).

Die geometrische Auflösung in Azimuth- Richtung hingegen ist allein von der Antennenlänge abhängig und somit entfernungsunabhängig (LILLESAND & KIEFER 2000: 630, MARTINIS 2010: 11). Die entfernungsabhängige geometrische Auflösung in Range- Richtung hat neben einer Stauchung im near range auch zur Folge, dass die Bildhelligkeit im Bereich des far range abnimmt. Dies hängt einerseits mit dem flacheren Belichtungswinkel und andererseits mit der

verminderten Bodenzellengröße in far range Richtung zusammen (LILLESAND & KIEFER 2000: 642).

Die Seitensicht des SAR- Sensors verursacht darüber hinaus weitere geometrische Verzerrungen. Sie werden **layover**, **foreshortening** und **shadowing** genannt und treten besonders in Gebieten mit ausgeprägtem Relief auf (siehe Abbildung 2.1.5). Diese Arten der Verzerrung sind abhängig von der lokalen Hangneigung und dem verwendeten Beleuchtungswinkel.

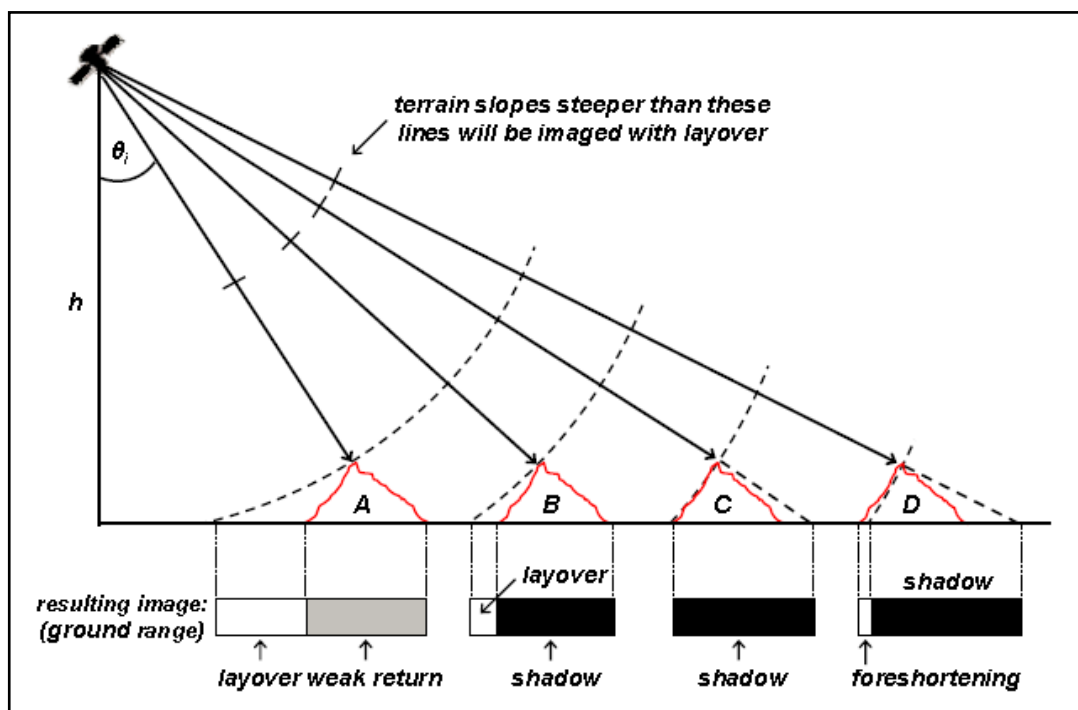


Abbildung 2.1.5: Die geometrischen Verzerrungen layover, foreshortening und shadow

Quelle: LILLESAND & KIEFER 2000

Zum layover Effekt kommt es, wenn der Beleuchtungswinkel kleiner ist als der Hangneigungswinkel, dann erreichen die Mikrowellen die Hangspitze vor dessen Hangfuß. Folglich ist die Signallaufzeit der Hangspitze kürzer als die des Hangfußes und die Hangspitze wird in der Slanrange Darstellung vor dem Hangfuß abgebildet. D.h. der Hang (bzw. Berg) klappt zum Sensor hin um. Dieser Effekt ist im near range am stärksten, da dort Beleuchtung am steilsten erfolgt. Die vom layover Effekt betroffenen Bereiche können nachträglich nicht mehr radiometrisch korrigiert werden, da unterschiedliche Objekte auf der Erdoberfläche

die gleiche Signallaufzeit haben und nicht mehr räumlich getrennt werden können. Daher sind in diesen Bereichen keine Bildinformationen verfügbar.

Der foreshortening Effekt tritt an Hängen auf, die einen kleineren Hangneigungswinkel als Beleuchtungswinkel haben. Dann ist die Zeitdifferenz zwischen der Beleuchtung der Hangspitze und dem Hangfuß geringer als deren horizontale Entfernung. Die Folge ist, dass der Hang in slant range gestaucht abgebildet wird. Gleichzeitig erscheinen diese Gebiete als helle Bereiche im SAR-Bild. Durch Orthorektifizierung ist diese Art der Verzerrung geometrisch korrigierbar.

Im Unterschied zu den genannten Verzerrungen betrifft der shadowing Effekt vom Sensor abgewandte Hänge. Ist der Hangneigungswinkel größer als der Beleuchtungswinkel können die Mikrowellenstrahlen dieses Gebiet nicht beleuchten, weil sie im sogenannten Radarschatten liegen. Als Folge erscheinen diese als dunkle Bereiche im SAR-Bild. Am stärksten ist der shadowing Effekt im far range, weil dort der Beleuchtungswinkel am größten ist. Da keine Informationen über diese Bereiche vorliegen, ist keine radiometrische Korrektur möglich (LILLESAND & KIEFER 2000: 630ff, CAMPBELL 1996: 206ff, KERLE et al. 2004: 220ff, ALBERTZ 2009: 56ff). Die Datenlücken sind, je nach Einfallswinkel und besonders im steilen Gelände, erheblich. Allerdings können die Datenlücken durch eine Kombination von Ascending/Descending Aufnahmen minimiert werden (WADGE et al. 2011: 145).

Neben systemspezifischen Eigenschaften wie der Aufnahmegeometrie, beeinflussen vor allem objektspezifische Eigenschaften die Stärke der empfangenen Strahlung. Die Oberflächenrauigkeit ist dabei neben Hangneigung und Einfallswinkel maßgeblich für die Stärke der empfangenen Strahlung verantwortlich. Unter Oberflächenrauigkeit versteht man den Grad der

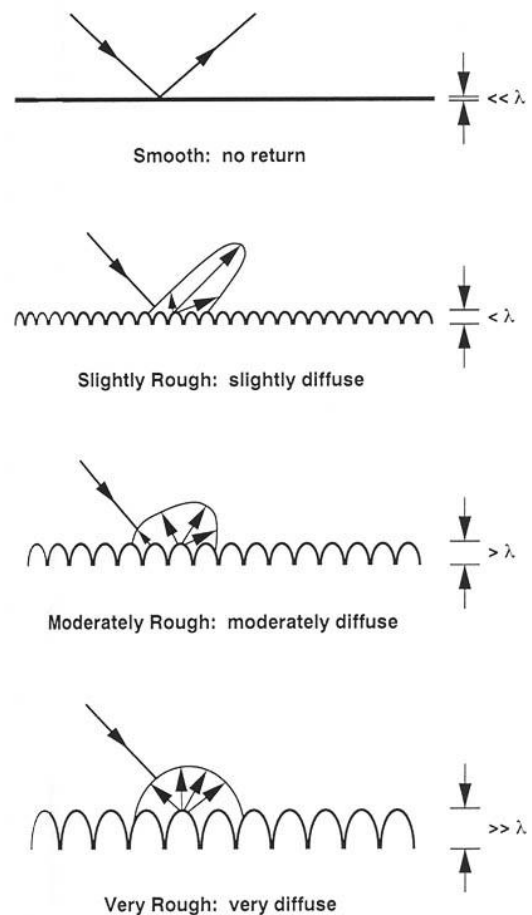


Abbildung 2.1.6: Effekt der Oberflächenrauigkeit auf das

Unregelmäßigkeit einer Oberfläche. Glatte Oberflächen (bspw. ruhiges Wasser, geteerte oder betonierte Flächen, kurz gemähte Wiesen) führen zu einer spiegelnden Reflektion und streuen die Mikrowellen vom Sensor weg. Dies führt zu einer sehr schwachen Rückstreuung der Mikrowellen in Richtung des Sensors und damit zu einem relativ dunklen Bereich im SAR Bild. Ist die Oberfläche rauer (bspw. Wald, Sträucher, Felder) nimmt der Anteil der diffusen Reflektion zu und es erreichen mehr Mikrowellen die SAR- Empfangsantenne (ULABY et al. 1982). Das Ergebnis ist ein hellerer Bildbereich. Die Rückstrahlungsintensität einer gegebenen Oberflächenrauigkeit ist dabei u. a. auch von der Wellenlänge, ausgedrückt in den Mikrowellenbändern, abhängig. So erscheinen bspw. Ackerflächen im X-Band grau, aber im P-Band schwarz (ALBERTZ 2009: 62). Folglich muss die Oberflächenrauigkeit mit zunehmend längeren Wellenlängen größer werden, um als rau abgebildet zu werden (siehe Abbildung 2.1.6).

Der Zusammenhang zwischen Oberflächenrauigkeit, Lokalem Einfallswinkel und Wellenlänge wird in dem sogenannten Rayleigh Kriterium dargestellt. Es geht davon aus, dass eine Fläche rau ist und somit die Mikrowellen diffus reflektiert, wenn die folgende Gleichung erfüllt ist:

$$\sigma_{\text{rms}} > \frac{\lambda}{8 \cos \theta_{\text{loc}}}$$

mit

$\sigma_{\text{rms}}$  = root-mean-square surface height variation,  
(Standardabweichung der Oberflächenhöhe)

$\lambda$  = Wellenlänge und

$\theta$  = lokaler Einfallswinkel

(LILLESAND & KIEFER 2000: 646)

Da es bei dieser Einteilung nur glatte oder raue Oberflächen gibt, wurde von SABINS (1997) ein modifiziertes Rayleigh Kriterium entwickelt, welches auch mitteldraue Oberflächen unterscheidet. So gilt für raue Flächen:

$$\sigma_{\text{rms}} > \frac{\lambda}{4,4 \cos \theta_{\text{loc}}}$$

und für glatte Flächen:

$$\sigma_{\text{rms}} < \frac{\lambda}{25 \cos \theta_{\text{loc}}}.$$

Alle Oberflächen deren  $\sigma_{\text{rms}}$  zwischen diesen Werten liegen, gelten als mittelrau. Daraus ergibt sich bspw. für einen Einfallswinkel von  $37^\circ$  und einer Wellenlänge von 3,1 cm folgende Einteilung der root-mean-square surface height variation:

Glatte Oberfläche:  $\sigma_{\text{rms}} < 0,15 \text{ cm}$

Mittelraue Oberfläche:  $0,15 \text{ cm} < \sigma_{\text{rms}} < 0,88 \text{ cm}$

Raue Oberfläche:  $\sigma_{\text{rms}} > 0,88 \text{ cm}$

Außer der spiegelnden und der diffusen Reflektion gibt es noch den sogenannten double bounce Effekt. Bei dieser Reflexionsart befinden sich zwei dem Sensor zugewandte spiegelnd reflektierende Oberflächen nebeneinander, wobei eine horizontal und die andere vertikal ausgerichtet ist. Die eintreffenden Mikrowellen werden dann zwei Mal spiegelnd reflektiert und eine hohe Rückstrahlungsintensität erreicht die SAR- Antenne. Die resultierenden sehr hellen Bildpunkte können z.B. durch Gebäude verursacht werden (so genannter corner reflector, siehe Abbildung 2.1.7).

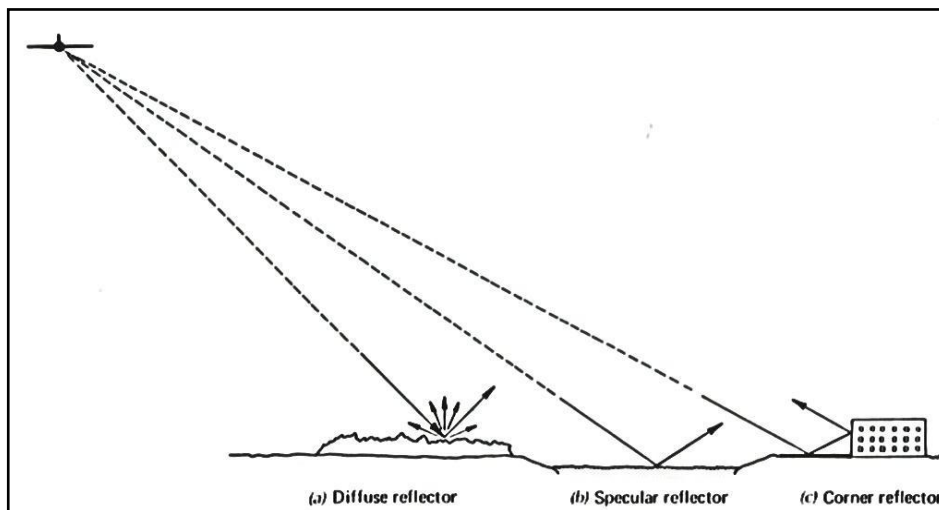


Abbildung 2.1.7: Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächen Quelle: SABINS 1997



Abgesehen von der Oberflächenrauigkeit beeinflusst auch die elektrische Eigenschaft des beleuchteten Objekts die Stärke der Mikrowellenrückstrahlung. Dies führt dazu, dass metallische Objekte wie z.B.: Stromleitungsmasten oder Zäune die Mikrowellen stark reflektieren. Da sich die elektrischen Eigenschaften z.B. eines Bodens in Abhängigkeit der Bodenfeuchte ändern, reflektiert ein feuchter Boden mehr Mikrowellenstrahlung als ein trockener. Weiterhin steuern die elektrischen Eigenschaften eines Bodens die Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlung in diesen. So können sie tiefer in den Boden eindringen wenn er trocken ist (ALBERTZ 2009: 61). Die elektrischen Eigenschaften eines Materials werden von der Dielektrizitätskonstante beschrieben.

Eine weitere Eigenschaft von Radarbildern ist der sogenannte **speckle** Effekt. Man versteht darunter kleinräumige Grauwertvariationen welche die tatsächliche Oberflächeninformation überlagern. Sichtbar wird der Speckle durch eine feinkörnige Strukturierung besonders in homogenen Bildbereichen. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch Phasen- Interferenzen der verwendeten kohärenten Mikrowellenstrahlung. Im Detail werden die dafür verantwortlichen physikalischen Vorgänge von GOODMAN (1967) beschrieben. Der speckle Effekt lässt sich reduzieren: dabei werden zum einen *multi-look* Verfahren und zum anderen *fensterbasierte* Filtertechniken verwendet (KERLE et al. 2004: 234). Bei den *multi-look* Verfahren wird die synthetische Antenne des SAR-Systems in mehrere Aperturen unterteilt. Jede Apertur erlaubt dabei einen unabhängigen Blick auf die Szene. Anschließend werden die Rückstreubeiträge der einzelnen Bilder zusammengefasst, um auf diese Weise den speckle Effekt zu reduzieren. Der Betrag der speckle- Reduzierung korreliert mit der Anzahl an Bildern, d.h. je höher die Menge an unabhängigen Bildern, desto größer der Effekt der speckle- Reduzierung. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass mit der multi-look Prozessierung gleichzeitig ein Verlust an geometrischer Auflösung einhergeht, welcher proportional zur Anzahl der verwendeten Bilder ist. Werden viele Bilder verwendet, ist die speckle Reduzierung groß, aber die geometrische Auflösung gering (LILLESAND & KIEFER 2000: 642). Ferner werden die *fensterbasierten* Filtertechniken genutzt. Dabei wird ein auf Basis eines Filterfensters für das zentrale Pixel ein Grauwert berechnet. Das Filterfenster hat eine definierte Größe (bspw. 3x3, 5x5 etc.) und wird pixelweise über das gesamte Bild bewegt. Zur Berechnung des Grauwerts werden mathematische Funktionen genutzt, die eine räumliche Mittelung der Grauwerte bewirken. Die Stärke der Mittelung hängt neben der

verwendeten Funktion von der Größe des Filterfensters ab. Die Herausforderung liegt darin, einen Algorithmus zu nutzen, der den speckle Effekt signifikant reduziert und gleichzeitig die Bildschärfe ausreichend bewahrt (KERLE et al. 2004: 234). Zu den bekanntesten Algorithmen gehören der Lee-, Frost-, Lee-Sigma- und Gamma-MAP- Filter (ESCH 2006: 40).

## 2.2. TerraSAR-X

Weil die in dieser Arbeit genutzten Fernerkundungsdaten hauptsächlich von dem Satelliten TerraSAR-X stammen, soll er in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Es handelt sich um einen 1,3 Tonnen schweren Satelliten, der circa 5 Meter hoch ist und einen Durchmesser von 2,5 Meter besitzt. Der Satellit wurde am 15 Juni 2007 vom Weltraumbahnhof in Baikonur (Kasachstan) auf einen 514 km hohen Orbit befördert. Nachdem die Test/Kalibrierungsphase im Januar 2008 beendet war, folgte sein operationeller Betrieb. Er wurde sowohl für wissenschaftliche als auch für kommerzielle Anwendungen entwickelt und wird in Public-Private-Partnership vom Zentrum für Deutsche Luft und Raumfahrt e.V. (DLR) und der EADS Astrium GmbH betrieben. Technologisch gesehen ist er eine Weiterentwicklung der Radarmissionen X-SAR (1994) und der Shuttle Radar Topography Mission SRTM (2000) (INFOTERRA 2009, WERNINGHAUS et al. 2010). Der Satellit bewegt sich auf einem polar-nahen sonnensynchronen Orbit, der entlang der Tag/Nacht Grenze verläuft. Die sogenannte *Wiederkehrzeit*, d.h. die Zeit bis der Satellit wieder an derselben Stelle seines Orbits ist, beträgt elf Tage (FRITZ & EINEDER 2010). Dann ist die Aufnahmeposition gegenüber einer bestimmten Erdoberfläche geometrisch gesehen (annähernd) die gleiche wie vor elf Tagen. Dies hat zur Folge, dass die SAR-Amplituden Bilder direkt miteinander verglichen werden können, was gerade im Hinblick auf eine Veränderungsdetektion von Bedeutung ist. Durch Verwendung verschiedener Beleuchtungswinkel und der Möglichkeit den Satelliten auch nach „links“ schauen zu lassen, ist TerraSAR-X in der Lage jeden Punkt der Erde in maximal zweieinhalb Tagen abzulichten (INFOTERRA 2009). Diese als *site access time* benannte Eigenschaft ist besonders im zeitkritischen Kontext der Kriseninformation von Bedeutung. Der Orbit wurde gewählt, weil er einen guten Kompromiss zwischen SAR-Leistungsfähigkeit, Auftragsstellung-Akquirierungs-Zeit und Wiederkehrzeit darstellt (WERNINGHAUS & BUCKREUSS 2010). Das Aufnahmesystem besteht aus einer fünf Meter langen und 80 Zentimeter breiten, aktiven X-Band Antenne, welche Mikrowellen mit 3,1 cm Wellenlänge (9,65 GHz) aussendet bzw. empfängt. Die geforderte Ausrichtungsgenauigkeit der SAR- Antenne beträgt 65

Bogensekunden, also etwa  $0,018^\circ$  und wird über Sternsensoren am Satelliten ermöglicht (DLR 2011). Je nach Aufnahmemodus sind geometrische Auflösungen von bis zu zwei Metern im *Spot Light (SL)* Modus möglich. Die Bildgröße beträgt dann 10 km x 10 km. Neben der geometrischen Auflösung und der Bildgröße sind auch der maximale Beleuchtungswinkel und die Polarisation vom Aufnahmemodus abhängig. Abbildung 2.2.1 zeigt die verschiedenen Aufnahmemodi, während Tabelle 2.2.1 die damit verbundenen Bildeigenschaften aufzeigt.

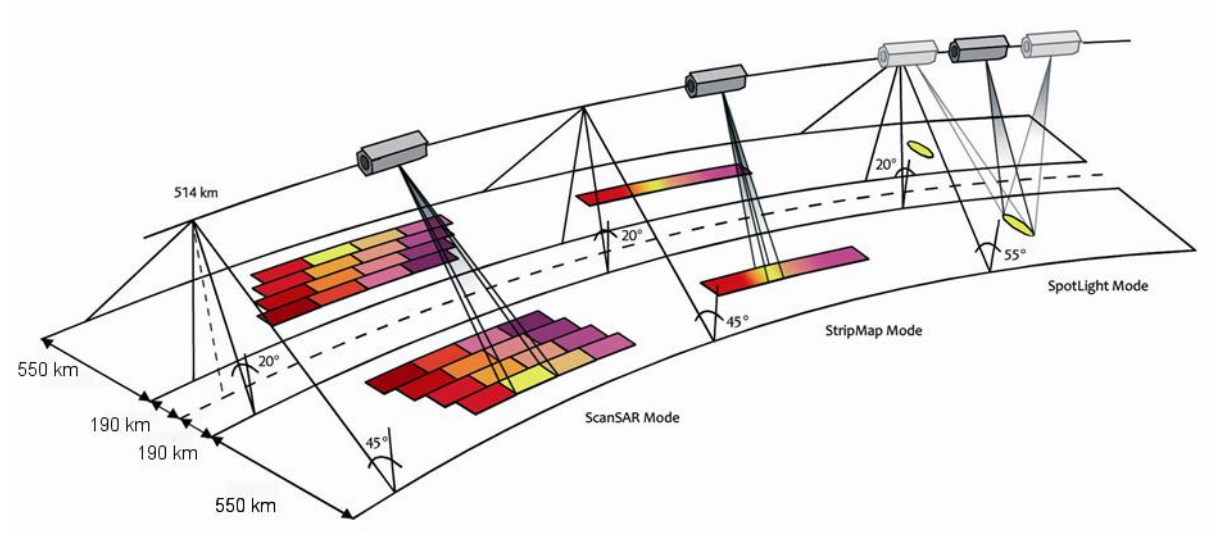


Abbildung 2.2.1: TerraSAR-X Aufnahmemodi Quelle: DLR

Tabelle 2.2.1: TerraSAR-X Aufnahmemodi Quelle: verändert nach SCHEUCHL 2009: 7458

	SpotLight	StripMap	ScanSAR
Polarisation	HH oder VV	HH oder VV	HH oder VV
Szenen Größe	10 km x 10 km	50 km x 30 km	150 km x 100 km
Volle Arbeitsleistung	20° - 55°	20° - 45°	20° - 45°
Geometrische Auflösung in Azimuth	1,7 m	3,3 m	18,5 m
Geometrische Auflösung in Groundrange	1,48 m - 3,49 m	1,7 m - 3,49 m	1,7 m - 3,49 m

Neben dem Aufnahmemodus kann der Nutzer auch zwischen verschiedenen Verarbeitungsstufen der Fernerkundungsdaten auswählen. Diese lauten: *Single Look Slant Range Complex*, *Multi Look Ground Range Detected*, *Geocoded Ellipsoid Corrected* und *Enhanced Ellipsoid Corrected*. Die genannten Bildprodukte werden durch den *TerraSAR-X Multi Mode SAR Prozessor* generiert und sind durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

### **Single Look Slant Range Complex (SSC)**

Das SSC Format ist ein sogenanntes *single look* Produkt des fokussierten Radar Signals. Die Daten sind in Form komplexer Zahlen gespeichert und enthalten Informationen zur Amplitude und Phase des empfangenen Mikrowellenechos. Das SSC wird im binären *COSAR* Format angeboten, das von der DLR definiert wurde. Da die Phase im SSC Format enthalten sind Interferometrische Analysen mit diesem Format möglich.

### **Multi Look Ground Range Detected (MGD)**

Bei dem MGD Produkt handelt es sich um ein *multi look* Produkt mit reduziertem *speckle* Rauschen und annähernd quadratischen Rasterzellen. Die Bildkoordinaten sind entlang der Flugrichtung (*azimuth*) und in *groundrange* Richtung orientiert. Für die Umwandlung von Slant Range zu Ground Range wurde der *WGS84* Ellipsoid mit einer durchschnittlichen Geländeoberfläche verwendet. Im MGD Format sind keine Interpolationsartefakte, welche durch Bildtransformation an ein geographisches Koordinatensystem entstehen, vorhanden. Es eignet sich daher für Anwendungen bei denen keine Geokodierung benötigt wird.

### **Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)**

Das GEC Produkt ist ein weiterverarbeitetes MGD Produkt. Es wurde in ein geographisches Koordinatensystem transformiert. Verfügbar sind *Universal Transversal Mercator* (UTM) oder *Universal Polar Stereographic* (UPS) Koordinatensysteme. Weil bei der Transformation das *WGS84* Ellipsoid mit einer durchschnittlichen Höhe verwendet wurde, gab es keine Berücksichtigung der Geländeoberfläche. Die Lagegenauigkeit des GEC Produktes hängt somit stark von der Art der abgebildeten Erdoberfläche ab. D.h. ein Gebiet mit flachem Relief hat eine gute Lagegenauigkeit, ein Gebiet mit steilem Relief hingegen eine schlechte.

### Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)

Bei dem EEC Produkt handelt es sich um ein MGD Produkt bei dem die Bildverzerrungen durch die Verwendung eines Digitalen Höhenmodells (*digital elevation model, DEM*) korrigiert wurden. Die Lagegenauigkeit dieses Produktes ist abhängig vom Geländere relief, der Qualität und Auflösung des *DEM* sowie dem Einfallswinkel der Aufnahme. Das EEC ist direkt mit anderen Geoinformationen kombinierbar.

### 2.3. Das Untersuchungsgebiet Merapi

Der 2968 Meter hohe Stratovulkan Merapi befindet sich auf 110,442° östlicher Länge und 7,542° südlicher Breite (Smitsonian Institute 2011) (siehe Abbildung 2.3.1). Aufgrund seiner Äquatornähe herrscht wechselfeuchtes tropisches Klima. Während der Monate Juni bis September herrscht eine relative Trockenzeit. Zwischen Oktober und Mai sind die Niederschläge relativ hoch und es ist Regenzeit. Der obere Bereich des Merapi ist durch häufige vulkanische Aktivität vegetationslos (Smithsonian Institute 2011). Die vorherrschende Windrichtung wird von den ganzjährig wehenden Passaten gesteuert. Im Nordsommer wehen sie aus nordöstlicher Richtung, im Nordwinter aus südöstlicher Richtung.

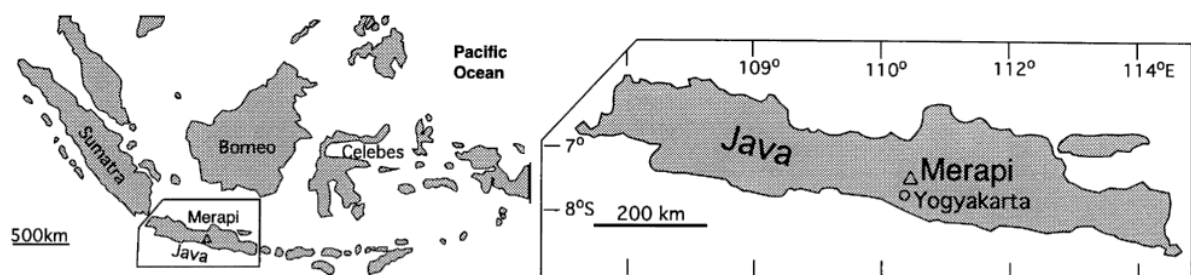


Abbildung 2.3.1: Lage des Merapi Quelle: verändert nach BOUDON et al. 1993

Der Merapi befindet sich auf der indonesischen Insel Java. Java ist die Insel mit der höchsten Bevölkerungsdichte der Welt. Sie betrug im Jahr 2005 etwa 1007 Einwohner/km<sup>2</sup> (TADJOEDDIN et al. 2011: 6). Die Hänge des Merapi befinden sich in den vier Regierungsbezirken: Sleman, Magelang, Boyolali und Klaten. In Abbildung 2.3.2 ist die Provinzgrenze als durchgezogene graue Linie und die Kabupaten (Bezirks-) Grenze als gepunktete schwarze Linie abgebildet. Die farbigen Ringe zeigen Equidistanzen zum Gipfel des Merapi mit einem Radienintervall von je fünf Kilometern an. Die roten Linien zeigen Hauptverkehrswege von Yogyakarta nach

Magelang (im Westen) bzw. nach Surakarta (im Osten) an. Bis zur Stadt Yogyakarta sind vom Gipfel des Merapi etwa 30 km in südsüdwestlicher Richtung. In Yogyakarta befindet sich ein internationaler Flughafen und zahlreiche weitere wichtige Infrastruktur (Krankenhäuser, Administration etc.). Die Strasse nach Magelang ist z.T. näher als 20 km vom Gipfel des Merapi entfernt.

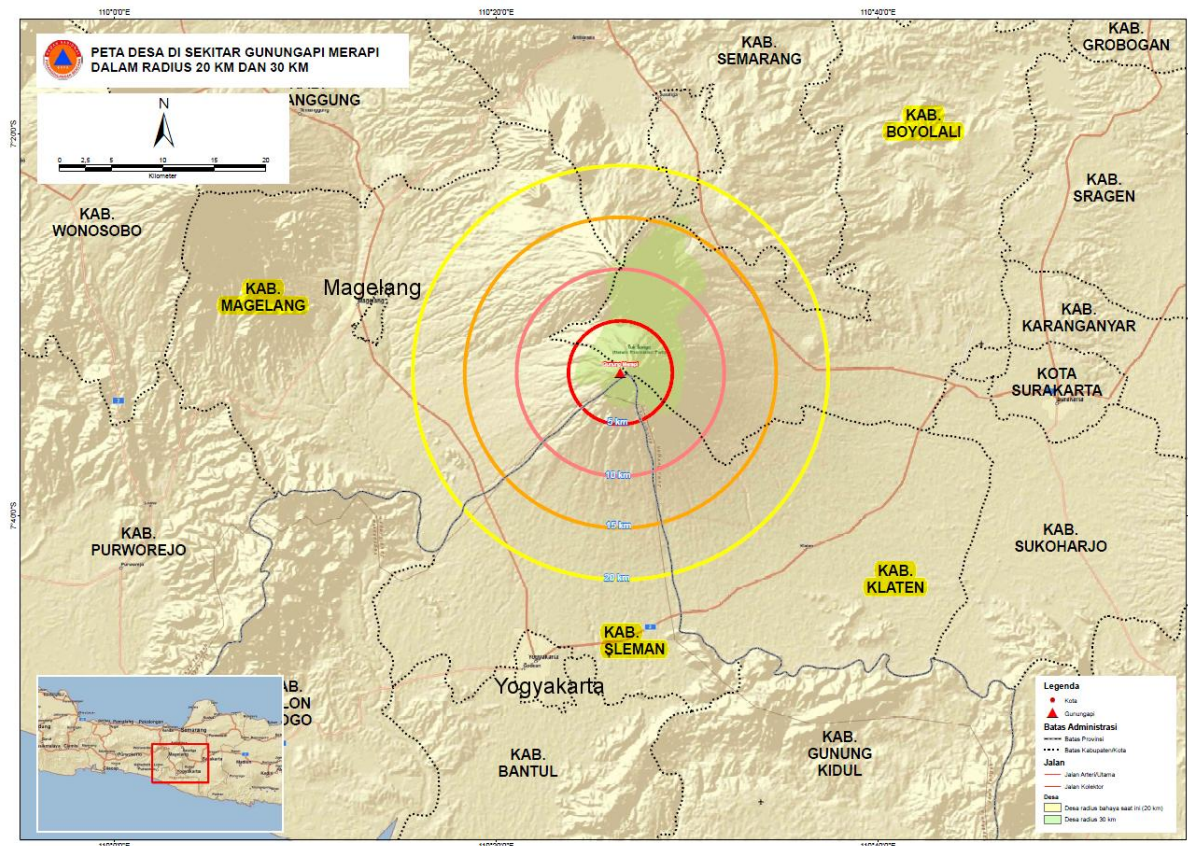


Abbildung 2.3.2: Lage des Untersuchungsgebiet Merapi Quelle: BNPB

Von den in Kapitel 1 genannten 1.1 Millionen Menschen, die am Merapi siedeln (LAVIGNE et al. 1995), leben etwa 440 000 Menschen in Gebieten, welche durch unmittelbare vulkanische Aktivität gefährdet sind. Weitere etwa 80 000 Menschen leben in einem hoch gefährdeten Bereich, innerhalb der sogenannten verbotenen Zone, die durch häufig auftretende vulkanische Aktivität charakterisiert ist (THOURET et al. 2000).

Abbildung 2.3.3 zeigt das Untersuchungsgebiet Merapi auf einem Landsat 7- Satellitenbild vom Mai 2003 mit der Kanalkombination 5-4-3. Zu erkennen ist im nördlichsten Bereich die Vulkanruine des Merbabu sowie im Zentrum der Abbildung die offenen Gesteinsflächen des Merapi in violett. An dessen Südhang sind die Stadt Kaliurang (rosa), das Flussbett des Kali



Gendol (violett) und die Rasenfläche eines Golfplatzes (in hellgelb) zu erkennen. Die Fotografien A, B, C in dieser Abbildung zeigen den Vulkandom des Merapi (A), den Oberlauf des Kali Gendol (B) und dessen Unterlauf (C).

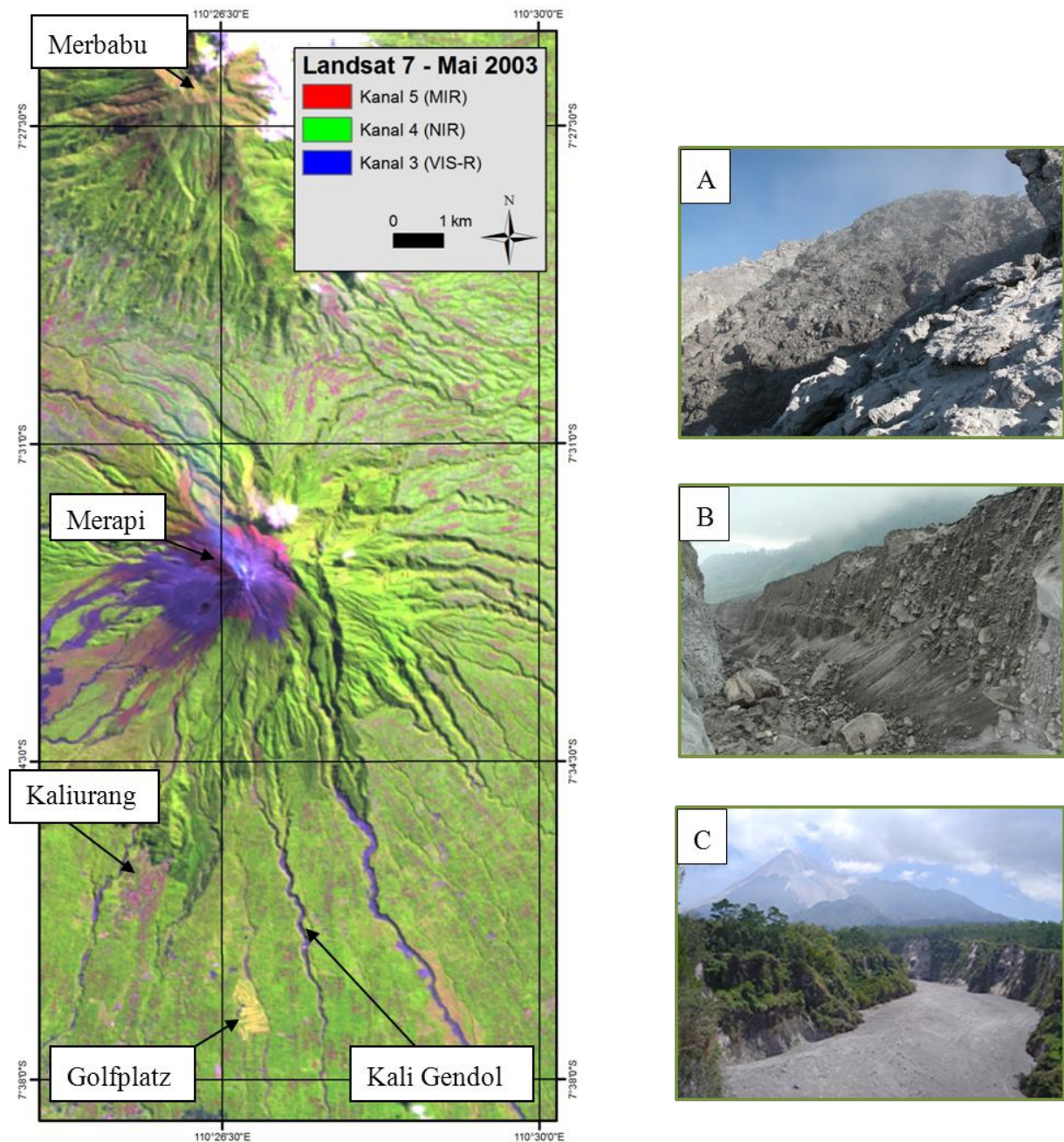


Abbildung 2.3.3: Das Untersuchungsgebiet Merapi, links: Landsat 7 TM – 5/4/3 RGB- Komposit im Mai 2003 Quelle: USGS ; rechts: A: Vulkandom, B) Oberer Bereich des Kali Gendol C) unterer Bereich des Kali Gendol

Quelle: Sylvain Charbonnier (A, B) & Ralf Gertisser (C), alle 2006

## Vulkanismus

Die Ursache für den Vulkanismus in dieser Region ist der etwa 5000 km lange Sunda Bogen (siehe Abbildung 2.3.4). Dieses Tiefseerinnen-Inselbogen System verläuft südlich von Sumatra, Java und den kleinen Sunda Inseln. Es handelt es sich dabei um eine aktive Subduktionszone, bei der die Indo- Australische Platte unter die Eurasische Platte subduziert wird und der mindestens 106 aktive Vulkane angehören (PICHLER et al. 2007: 208).

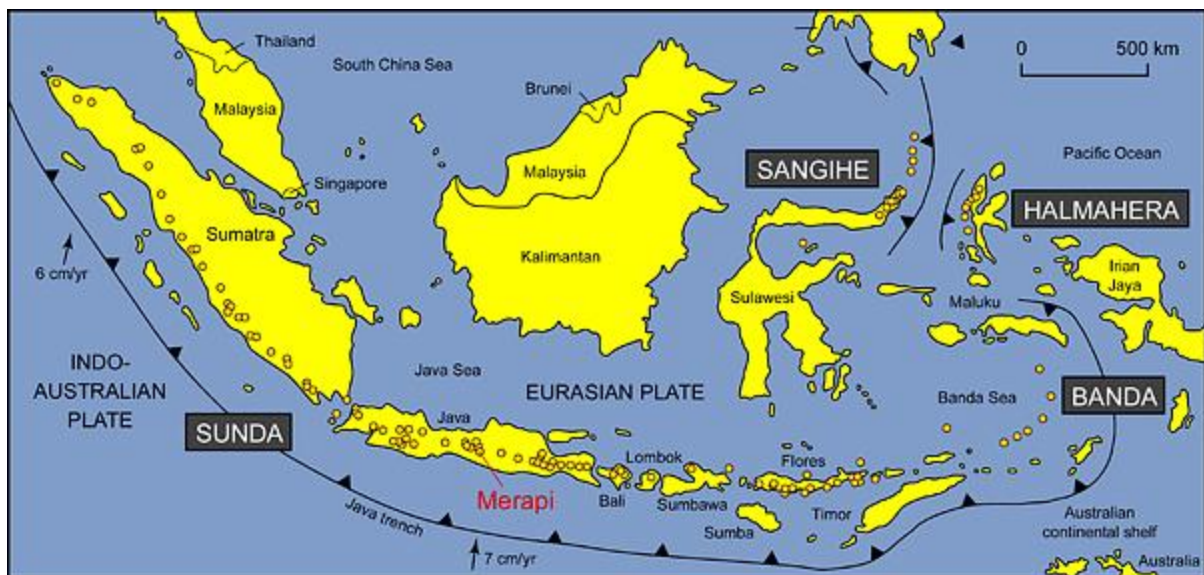


Abbildung 2.3.4: Karte des indonesischen Subduktionszonen- Systeme

Quelle: GERTISSER & KELLER 2003



Der Merapi ist einer von 16 aktiven Vulkanen auf der Insel Java. Er gilt als der zweitaktivste nach dem Semeru (SURYO & CLARKE 1985). Seit dem Jahr 1500 sind 61 Ausbrüche überliefert, wobei die letzten großen Eruptionen in den Jahren 1994, 1997, 1998, 2001, 2006 und 2010 stattfanden. Seit dem Jahr 1500 sind mindestens 7000 Menschen durch größere Eruptionen umgekommen (THOURET et al. 2000). Die Zeiten geringerer Aktivität überschreiten im Durchschnitt nicht mehr als dreieinhalb Jahre (SCHMINCKE 2010: 166).

Abbildung 2.3.5:

Pyroklastischer Strom am

Merapi 29.10.2010

Quelle: Dpa



Die Vulkanausbrüche am Merapi sind u.a. durch das Auftreten von pyroklastischen Strömen gekennzeichnet (siehe Abbildung 2.3.5). Pyroklastische Ströme sind Hochgeschwindigkeits-Lawinen, bestehend aus heißer Asche, Gesteinsbruchstücken und Gasen, die an Vulkanhängen herabströmen. Sie können Geschwindigkeiten von mehr als 200 km/h und Temperaturen von mehr als 800°C erreichen (MYERS & BRANTLEY 1995). Sie entstehen entweder durch Kollaps einer Eruptionswolke oder durch Kollaps eines Vulkandoms. Sie treten bei mehr als der Hälfte der weltweiten explosiven Vulkanausbrüche auf und sind wegen der möglichen hohen Geschwindigkeit/Temperatur häufig gefährlich (SCHMINCKE 2010). Pyroklastische Ströme werden weiter in Block & Ascheströme und *Surges* eingeteilt. Die pyroklastischen Block & Ascheströme sind als basale Grundlawine zu interpretieren, während der Surge als Asche-Gas-förmige Glutwolke zu interpretieren ist (SCHMINCKE 2010). Weil nirgends so häufig pyroklastische Ströme auftreten und beobachtet werden wie am Merapi nennt man sie auch *nuées ardentes* (französisch, wörtliche Übersetzung: Wolke aus Feuer) vom Merapi-Typ (SCHMINCKE 2010: 166).

Pyroklastische Ströme entstehen am Merapi in erster Linie durch Dom Kollaps und nicht durch Kollaps einer Eruptionswolke. Dabei tritt kontinuierlich viskose, d.h. zähe Lava am Gipfel aus und bildet einen Dom. Wächst der Dom über eine Größe von etwa zwei bis vier Millionen Kubikmetern hinaus an, beginnt er aufgrund der Schwerkraft instabil zu werden und kollabiert (JOUSSET 2010: 1). Dabei brechen Teile des Doms ab, werden fragmentiert und bewegen sich in Form von Block & Ascheströmen und Surges hangabwärts (SCHMINCKE 2010: 168). Bei der Fragmentierung der, z.T. noch zähflüssigen Gesteine kommt es zur Entgasung. Dieses Gas bildet zusammen mit Aschepartikeln den Surge (SCHMINCKE, 2010: 169f). Während die Block & Ascheströme meist auf Täler beschränkt sind, neigt der Surge aber aufgrund seines Gas-förmigen Aggregatzustands dazu, auch angrenzende Gebiete zu erreichen (THOURET et al. 2010, SCHMINCKE 2010: 170).

### *Aktuelle Ereignisse*

Der Ausbruch des Merapi 2010 erzeugte zahlreiche pyroklastische Ströme. Die maximal erreichten Distanzen sowie ihre Richtung zeigt die folgende Abbildung 2.3.6.

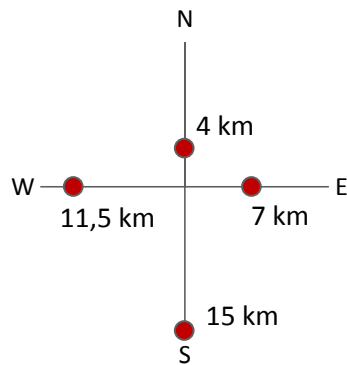


Abbildung 2.3.6: Entfernungen der pyroklastischen Ströme (rote Punkte markieren die maximale Distanz zum Gipfel des Merapi) Quelle: eigene Darstellung nach JOUSSET 2010

Die eruptive Phase des Merapi begann am 26.10.2010 und endete Anfang Dezember des Jahres 2010. Sie lässt sich nach JOUSSET (2010) in vier Phasen einteilen:

Phase eins: Die erste Phase der Vulkaneruption begann schon Anfang 2009 mit unterirdischem Magma Zustrom und damit verbundener erhöhter Erdbeben Tätigkeit. Mitte September 2010 äußerte das CVGHM seine Befürchtung, dass der Merapi wahrscheinlich in den nächsten drei Monaten ausbrechen werde. Am 20. September wurde die Warnstufe von eins auf zwei erhöht (Skala von eins bis vier, eins = normale Aktivität; zwei = Vorsicht; drei = „sei bereit“; vier = Gefahr), da die Erdbeben Tätigkeit weiter zunahm und der Vulkandom sich zunehmend verformte. In den folgenden Wochen stieg die Seismische Aktivität weiter an und die Deformationsraten des Doms stiegen auf bedenkliche Werte ( $> 20\text{-}30\text{ cm / Tag}$ ). Am 21. Oktober 2010 wurde die Warnstufe auf drei erhöht. In den nächsten vier Tagen stieg die Erdbeben-tätigkeit auf über 250 Erdbeben pro Tag an und die Deformation des Doms betrug mehr als 50 cm pro Tag. Dies veranlasste das CVGHM am 25. Oktober dazu, die höchste Warnstufe, Stufe vier, auszurufen. Es bedeutete die Evakuierung der Bevölkerung in einem Umkreis von 10 km um den Gipfel, 35 Stunden vor der ersten Vulkaneruption! Am 26. Oktober um 17:02 Uhr (10:02 UTC) fand die erste Vulkaneruption statt (Jousset, 2010; Smithsonian Institute 2010). Die Eruption zerstörte den vorhandenen Dom und löste zahlreiche pyroklastische Ströme aus. Diese erreichten eine Länge von sechs bis sieben Kilometern in südlicher Richtung und forderten mehr als 30 Todesopfer im Dorf Kinarejo (Smithsonian Institute 2010).

Phase zwei: Nach einer kurzen Zeit relativer Ruhe, begann neues Magma im Krater aufzusteigen und einen neuen Dom zu bilden.

Phase drei: Am dritten November 2010 begann die dritte Phase mit einer Reihe von Vulkaneruptionen mit zunehmender Intensität und Häufigkeit. Das CVGHM vergrößerte daher den Evakuierungsradius auf 15 km. Am fünften November 2010 um 00:05 Uhr lokaler Zeit (17:05 UTC, 4.11.2010) fand die stärkste Vulkaneruption im Jahr 2010 statt. Es handelte sich um eine Vulkaneruption mit einer von SURONO (2010) geschätzten Stärke vier auf dem Vulkanologischen Explosivitäts Index (VEI). Sie produzierte pyroklastische Ströme bis zu einer Länge von 15 km in südlicher Richtung (Kali Gendol). Bereits einige Stunden vor der Eruption vergrößerte das CVGHM den Evakuierungsradius auf 20 km und konnte so viele Leben retten (JOUSSET 2010, SURONO 2010).

Phase vier: Diese letzte Phase ist durch pyroklastische Ströme und Entgasung gekennzeichnet. Explosionen wurden bis zu 30 km Entfernung in Yogyakarta gehört. Am dritten Dezember wurde die Warnstufe durch das CVGHM von vier auf drei gesenkt und die vulkanische Aktivität begann signifikant schwächer zu werden.

Insgesamt sind mehr als 300 Menschen gestorben und mehr als 380 000 Menschen wurden zumindest zeitweise zu Flüchtlingen. Niemals vorher sind so viele Menschen wegen einer Vulkaneruption evakuiert worden (JOUSSET, 2010: 4).

Die folgenden Fotografien sollen die Situation nach dem Vulkanausbruch des Merapi im Jahr 2010 verdeutlichen. In Abbildung 2.3.7 ist ein Block und Aschestrom am Kali Gendol zu sehen. Seine glatte Oberfläche ist gut erkennbar und durch einzelne Blöcke unterbrochen. In Abbildung 2.3.8 ist eine Pre- und eine Post- Disaster Aufnahme desselben Hauses zu sehen. Die verbrannten Blätter sind auf der Post- Disaster Aufnahme zu erkennen. Dieses ist durch die große Hitze des Surges erklärbar. In Abbildung 2.3.9 ist eine tote Kuh unter einer unverbrannten Vegetation zu erkennen. Aus dieser Abbildung lässt sich schließen, dass die Temperatur nicht hoch genug war um die Blätter zu verbrennen, also auch nicht um die Kuh zu töten. Dies geschah vermutlich durch den hohen Gehalt an Schwebstoffen in der Luft, die eine Erstickung herbeiführten. Dies bedeutet, dass relativ weit entfernte Gebiete trotz niedriger Surge- Temperaturen aber aufgrund des hohen Gehaltes an Schwebstoffen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu den Gefahrenbereichen gehören.



Abbildung 2.3.7: Block & Aschestrom am Kali Gendol am 11.11.2010 Quelle: Antara Foto



Abbildung 2.3.8: Pre- (links) und Post- (rechts) Disaster Aufnahme am Kali Gendol 15 km vom Gipfel entfernt, 2010 Quelle: BAIQUNI



Abbildung 2.3.9: Tote Kuh unter unverbrannter Vegetation Quelle: AFP/ Getty Images

## 2.4. Datenbasis

Die Datenbasis besteht in der Hauptsache aus vier TerraSAR-X Szenen. Es handelt sich dabei um zwei Bildpaare mit jeweils gleichen Aufnahmeparametern (Orbit, Einfallswinkel). Bildpaar eins wurde am 26.10.2010 und am 6.11.2010 im StripMap Modus aufgenommen. Bildpaar

zwei wurde am 4.10.2010 und am 15.11.2010 im SpotLight Modus aufgenommen. Die SAR-Bilder sind alle im EEC Format vorhanden, zusätzlich ist das StripMap Bildpaar im SLC Format vorhanden. Alle TerraSAR-X Aufnahmen wurden über [www.eoweb.de](http://www.eoweb.de) bestellt und von der DLR zur Erstellung der vorliegenden Arbeit kostenfrei zur Verfügung gestellt.

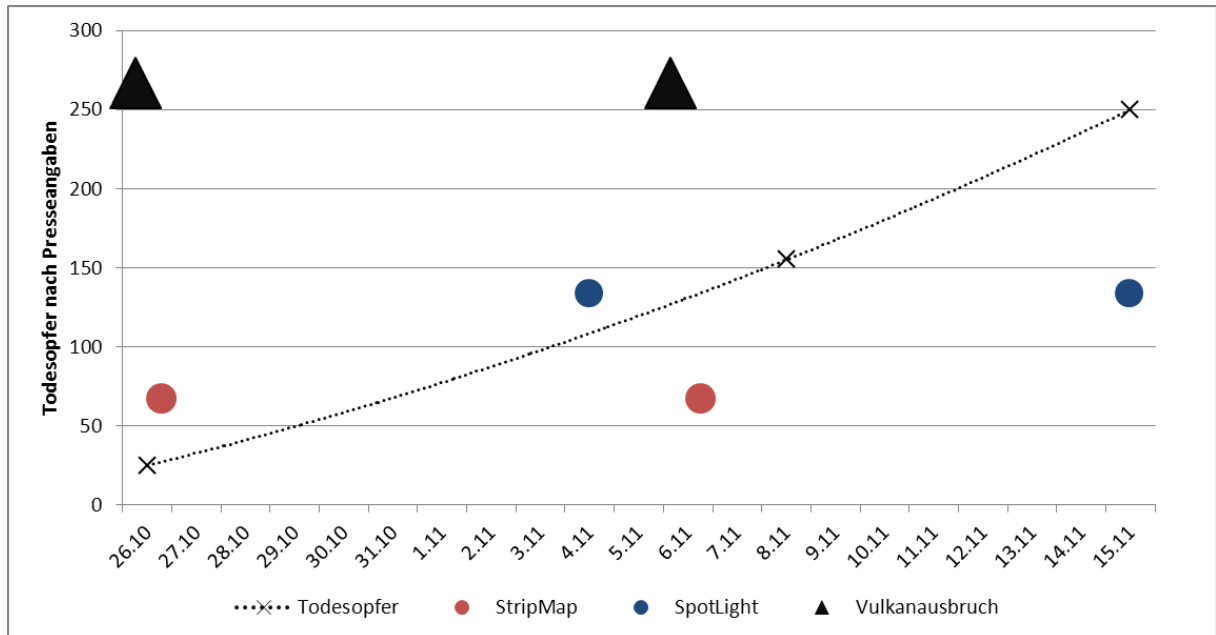


Abbildung 2.4.1: Datenbasis TerraSAR-X Bildpaare (Quelle: DLR), Vulkanausbrüche & Todesopfer (Auswahl) Quelle: Smithsonian Institute

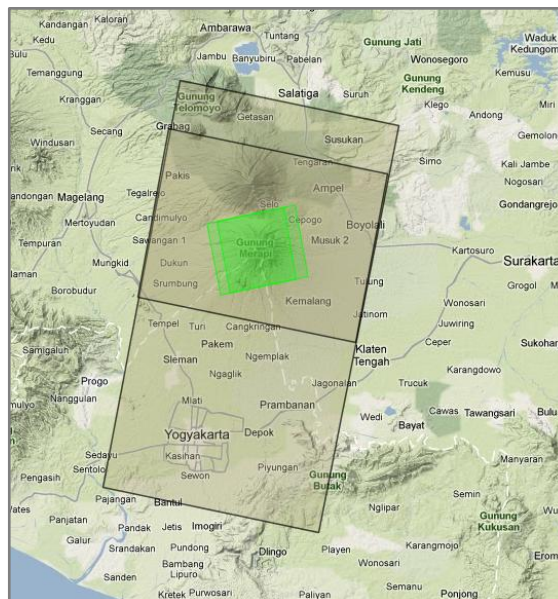


Abbildung 2.4.2: TerraSAR-X Footprints (grün: SpotLight Szenen, grau: StripMap Szenen)

Quelle: Infoterra



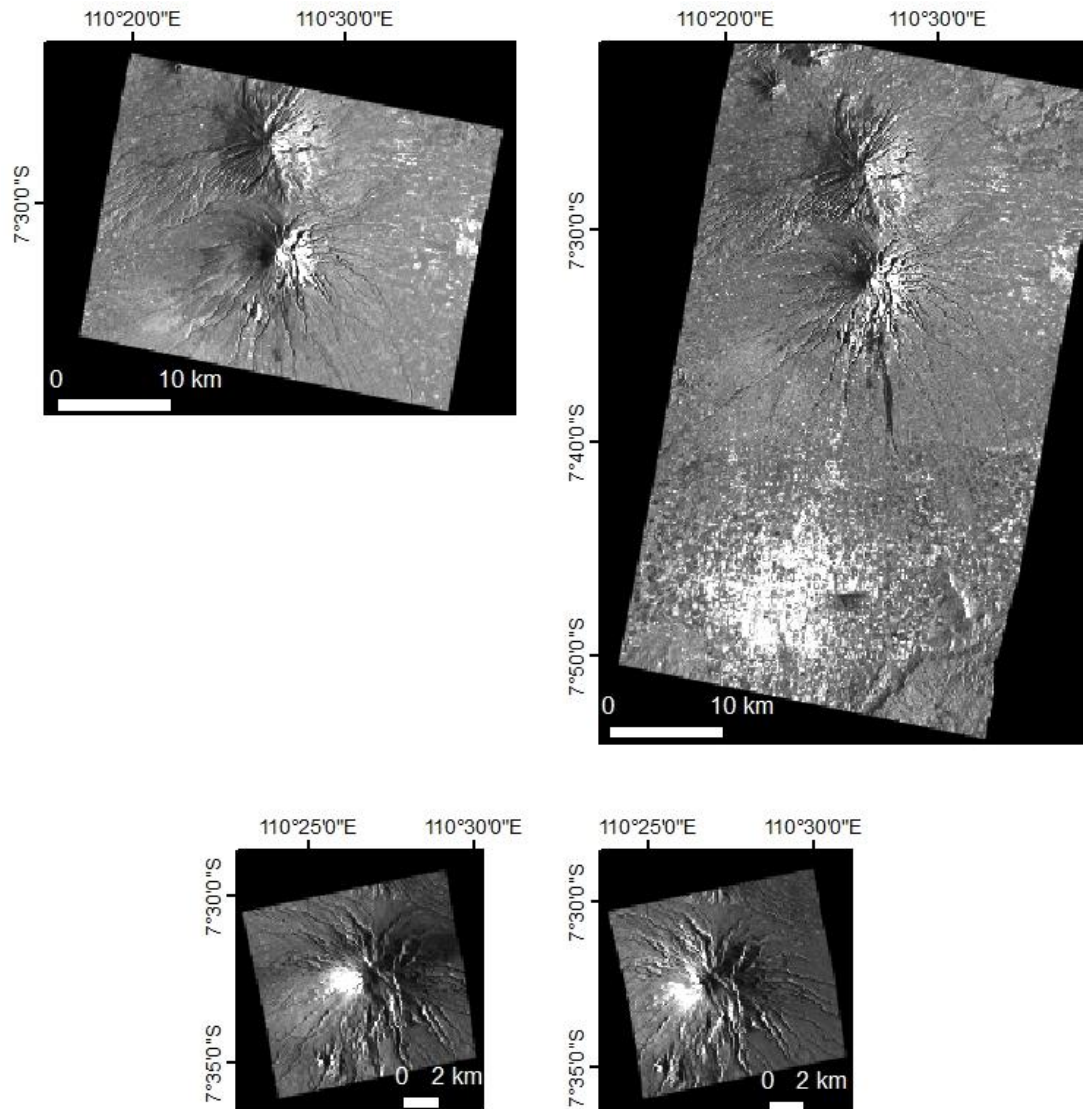


Abbildung 2.4.3: Datenbasis TerraSAR-X Szenen (oben links: 26.10.2010, oben rechts: 6.11.2010, unten links: 4.11.2010, unten rechts: 15.11.2010) Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 2.4.1: Ausgewählte Bildeigenschaften der TerraSAR-X Szenen

Quelle: eigene Darstellung

	Datum	Orbit	Inc. Ang.	Format	Überlappungsbereich	Pixelgröße
StripMap	26. Okt	134 D	36° - 38°	EEC; SLC	25 km x 32 km	2,5 m x 2,5 m
	06. Nov	134 D	36° - 38°	EEC; SLC		
SpotLight	05. Nov	96 A	46° - 47°	EEC	10 km x 10 km	1,75 m x 1,75 m
	15. Nov	96 A	46° - 47°	EEC		

In Abbildung 2.4.1 ist der Zeitablauf der TerraSAR-X Aufnahmen, einer Auswahl von Vulkanausbrüchen (rote Dreiecke) und von der Presse überlieferte Opferzahlen dargestellt. Die Opferzahlen beziehen sich auf die Anzahl der Todesopfer seit dem Anfang des Vulkanausbruchs am 26.10.2010. Die markierten Vulkanausbrüche sind erstens der Beginn der Eruption und zweitens der größte Ausbruch. Die TerraSAR-X Aufnahmezeitpunkte sind je nach Aufnahmemodi (StripMap oder SpotLight) als blaue bzw. rote Punkte abgebildet. Die Lage der TerraSAR-X Szenen ist in Form von sogenannten footprints in Abbildung 2.4.2 dargestellt. Der graue Rahmen zeigt die Lage der StripMap, der grüne Rahmen die der SpotLight Szenen an. Abbildung 2.4.3 zeigt die TerraSAR-X Datenbasis im EEC Format. In Tabelle 2.4.1 sind die Bildeigenschaften der verwendeten TerraSAR-X Szenen aufgelistet. Dort ist ersichtlich, dass die SpotLight Szenen im aufsteigenden (Ascending: A) Orbit aufgenommen wurden und die StripMap Szenen im absteigenden (Descending: D) Orbit. Neben diesen Aufnahmen ist ein SRTM- DEM (Aufgenommen im Jahr 2000) sowie Satellitenbilder der Sensoren: ASTER (15.11.2010) und WorldView (11.11.2010) vorhanden. Sie wurden von der NASA bzw. von der USGS bereitgestellt. Neben Fernerkundungsdaten sind auch GIS-Daten vorhanden. Diese beinhalten BAPPEDA Landnutzungsdaten der Provinz Yogyakarta und ZKI Interne Daten über administrative Grenzen.

Für die Bildverarbeitung wurde ERDAS Imagine und ENVI IDL (inklusive der Erweiterung SARscape) verwendet. Zur Klassifikation wurde eCognition genutzt; außerdem ArcGIS für die GIS-Verschneidung und kartographische Darstellung.

## **2.5.Vorverarbeitung**

Die Vorverarbeitung umfasst folgende Schritte: Speckle Reduzierung, Überlappungsbereich extrahieren und zusätzlich bei SLC Produkten Orthorektifizierung. Diese Prozesse werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben, um einen vollständigen Blick auf die verwendeten Bildverarbeitungsschritte zu ermöglichen.

### ***Speckle Reduzierung***

Um den Speckle, die kleinräumige Grauwert-Variation, zu minimieren, wurde der Gamma-MAP Filter angewandt. Dabei handelt es sich um eine fenster-basierte Filtertechnik. Der Gamma-MAP Filter (MAP steht für Maximum A Posteriori) basiert auf einem multiplikativen Modell mit nichtstationären Durchschnitt unter Berücksichtigung der lokalen Varianz. Der

Filter geht davon aus, dass der originale Grauwert zwischen der Digital Number (DN) des zentralen Pixels und dem Durchschnitt des Filterfensters liegt. Verschiedene Filtertechniken (z.B. Lee, Lee-Sigma, Frost) gehen dabei von einer Gauss-Verteilung des Speckle Rauschens aus. Neuere Arbeiten haben gezeigt, dass dieser Ansatz für viele natürliche Oberflächen nicht zutrifft (ERDAS Inc 2010). Es wurde gezeigt, dass Erdoberflächen mit natürlicher Vegetation besser durch eine Gamma Verteilung beschrieben werden. Der Gamma-MAP Filter geht von einer Gamma Verteilung des Speckle aus (LOPES et al. 1990) und wird daher hier zur Speckle-reduzierung verwendet. Bei dieser Filterung wird zwischen homogenen und inhomogenen Bereichen unterschieden. So bleiben in heterogenen Bildbereichen z.B. starke Punktstreuer oder Kanten weitgehend erhalten, während in homogenen eine starke Reduzierung des Speckle erzielt wird (SÖRGEL 2008: 47). In dieser Arbeit wurde ein Filterfenster mit einer Größe von 3x3 Pixeln verwendet. Das Ergebnis der Filterung wird in Abbildung 2.5.1 dargestellt. Deutlich erkennt man einzelne Punktstreuer im gefilterten Bild, während diese im ungefilterten Bild nicht vom Speckle zu unterscheiden sind (Bildmitte oben).

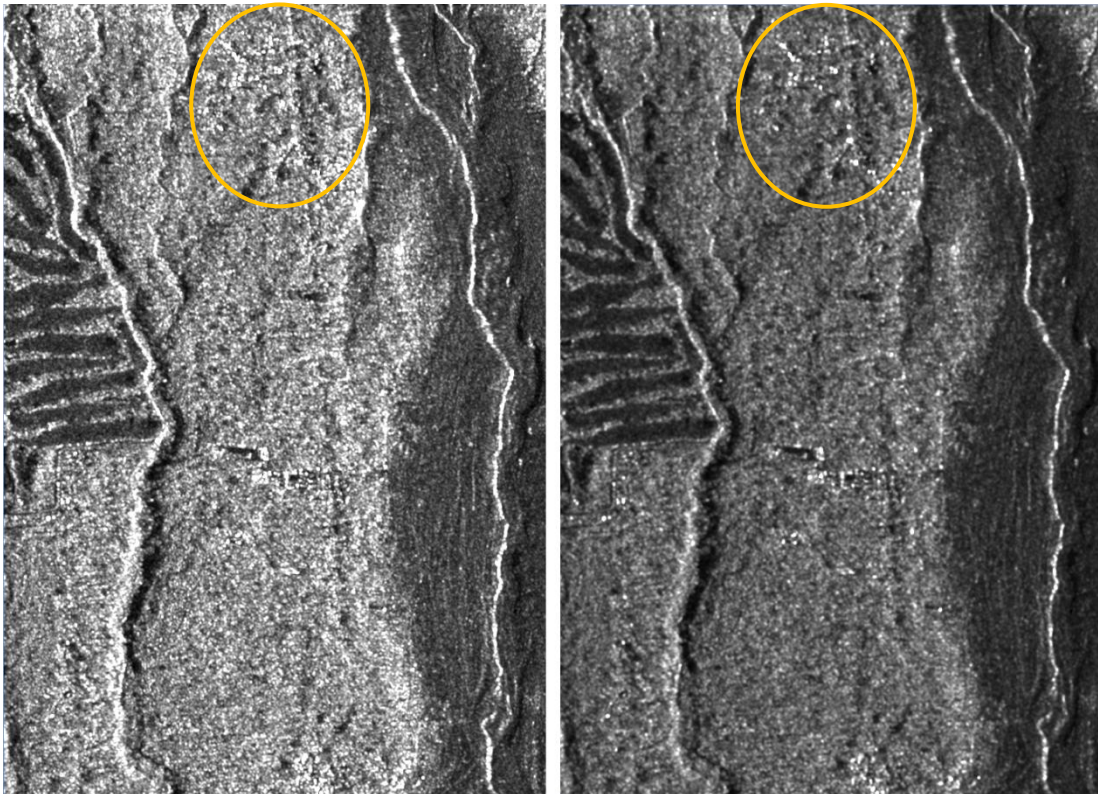


Abbildung 2.5.1: Vergleich von ungefiltertem (links) und Gamma-MAP gefiltertem (rechts)  
SAR-Bild Quelle: eigene Darstellung



### *Multilooking*

Das Ziel des Multilooking ist es, die durch die SAR typische Schrägsicht verursachten geometrischen Verzerrungen in Range und in Azimuth Richtung zu korrigieren, um immer annähernd gleichgroße quadratische Pixel zu erhalten. Die Anzahl der looks ist eine Funktion aus Pixel Abstand in Azimuth, Pixel Abstand in Slant Range und dem Einfallswinkel in der Bildmitte (Sarmap Inc. 2007: 58). Um welchen Faktor die Pixel in Range, bzw. Azimuth gestaucht werden müssen, wird durch die Anzahl der looks beim Multilooking beschrieben. Diese berechnet SarScape auf Basis der Metadaten der SLC Produkte.

### *Orthorektifizierung*

Die Orthorektifizierung transformiert das SAR-Bild von einer Slant Range Geometrie in eine Ground Range Geometrie. Das Bild wird dabei in ein kartographisches Koordinatensystem überführt (WGS 84, UTM Zone 49 Süd). Bei dieser Transformation wird neben präzisen Orbitinformationen der Aufnahmeplattform (Science Orbit) ein digitales Geländemodell verwendet, um Verzerrungen wie Layover oder Foreshortening geometrisch zu korrigieren. Die Genauigkeit der geometrischen Korrekturen ist abhängig von der Auflösung und der Genauigkeit des verwendeten DEM. In dieser Arbeit wurde ein SRTM DEM mit einer geometrischen Auflösung von 90m verwendet. Neben den topographischen Effekten werden auch der Einfluss der Erdrotation und die Höhe der Erdoberfläche bei der Bildtransformation berücksichtigt. Diese nutzt den sogenannten Range-Doppler Ansatz und wird bei CREASO Inc. (2007) näher erläutert. Diese Methode startet beim digitalen Geländemodell und berechnet für einen Punkt X die Position im SAR Slant Range Bild.

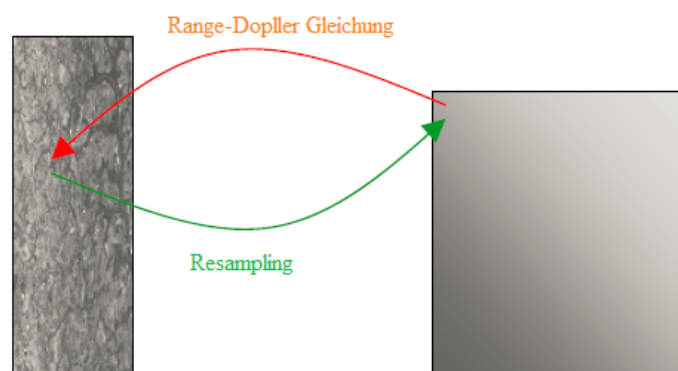


Abbildung 2.5.2: Methode der Orthorektifizierung, Slant Range Bild (links) & DEM (rechts)  
Quelle: CREASO Inc.

Daraufhin wird dieser Bildpunkt durch Resampling an die korrigierte Position transformiert (siehe Abbildung 2.5.2). Zum Resampling der Pixel wurde die Methode der nächsten Nachbarschaft (Nearest Neighbourhood) verwendet. Dabei wird der Transformierte Pixelwert aufgrund der Nähe zur Pixelmitte des Original Pixels bestimmt. In Abbildung 2.5.3 ist die Resampling Methode dargestellt. Das horizontal verlaufende Gitter zeigt die Pixelzellen des Originalbilds, während die diagonal verlaufenden Punkte die Mitten der transformierten Pixelzellen darstellen. So bekommt bspw. die orange eingefärbte Pixelmitte den Grauwert des roten Punkts, weil sich deren Pixelmitten am nächsten liegen.

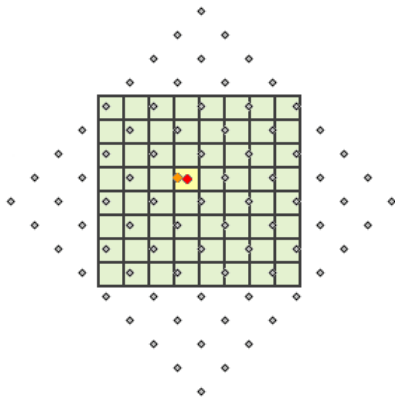


Abbildung 2.5.3 Methode der Nearest Neighbor Transformation  
Quelle: ESRI Inc.

Abbildung 2.5.4 zeigt das Ergebnis der Orthorektifizierung. Auf der linken Seite ist das SAR Bild ohne Orthorektifizierung und auf der rechten nach dieser Operation dargestellt. Das obere SAR-Bild 1a & 1b ist vom 26.10.2010, das untere 2a, 2b vom 6.11.2010. Zu erkennen sind die geometrischen Korrekturen besonders deutlich an den Vulkanen (Bildmitte).

Während sie im geometrisch nicht korrigierten SAR-Bild zum Sensor „umgeklappt“ dargestellt sind, erscheinen sie im korrigierten SAR-Bild „aufrecht“. Die erkennbare

Rotation in 1b & 2b wird durch die Nordung der geometrisch korrigierten SAR-Bilder hervorgerufen.

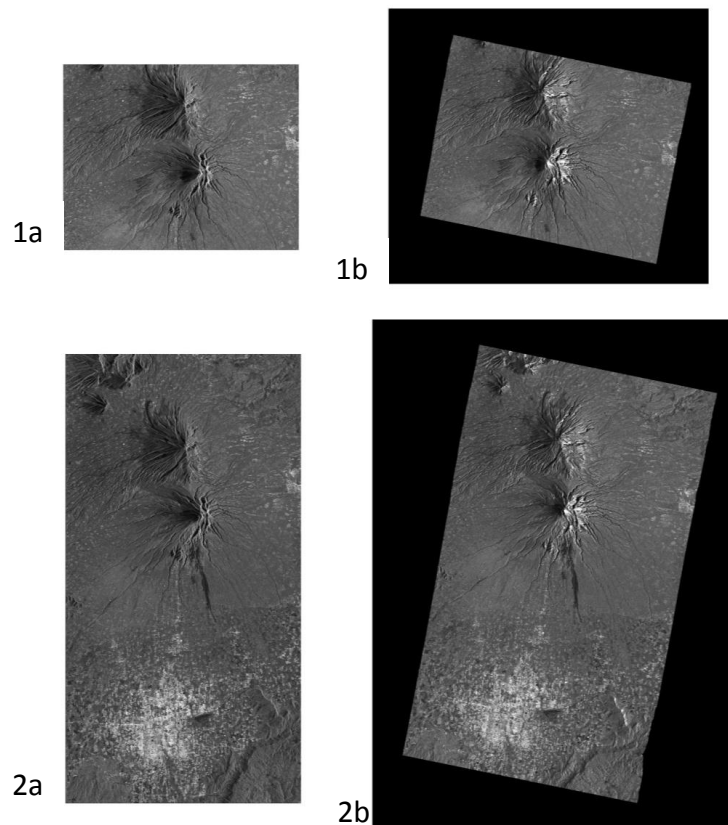


Abbildung 2.5.4: Vergleich SAR Bild ohne Orthorektifizierung (a) und mit Orthorektifizierung (b), Aufnahmezeitpunkte: 1: 26.10.2010; 2: 6.11.2010 Quelle: eigene Darstellung

### 3. Methoden und Ergebnisse

Das Methoden und Ergebnis Kapitel umfasst eine Auswahl von Methoden um aufzuzeigen wie aus SAR-Aufnahmen Kriseninformationen (vgl. Kapitel 1.1) extrahiert werden können. Es umfasst folgende Unterkapitel: Veränderungsdetektion (3.1), Bildinterpretation (3.2), Klassifikation der Gefahrenausdehnung (3.3), Schadensabschätzung (3.4), DEM-Erstellung (3.5) und Radarschattenanalyse (3.6). Jedes Unterkapitel besteht aus einem Methodik und Ergebnis-Abschnitt.

#### 3.1 Veränderungsdetektion

Die Veränderungsdetektion erfasst Änderungen der Erdoberfläche zwischen verschiedenen Zeitpunkten. In dieser Arbeit sollen damit vulkanische Ablagerungen zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten sichtbar gemacht werden. Voraussetzung für die Anwendung von Fernerkundungsdaten zur Detektion von Veränderungen der Erdoberfläche sind Veränderungen der Strahlungswerte der Erdoberfläche (MAS 1997: 140), dabei sind die

zeitlichen und räumlichen Auflösungen der SAR- Fernerkundungsdaten ein bestimmender Faktor. Die hier verwendeten Daten haben einen zeitlichen Aufnahmeabstand von elf Tagen und eine räumlich Auflösung von < 5 m.

### 3.1.1 Methoden

Um Amplitudenveränderungen der SAR- Bilder sichtbar zu machen, werden die absolute Differenz und eine Ratio berechnet. Zur Berechnung einer Ratio wird folgende Funktion angewendet:

$$nci = \frac{(T1 - T2)}{(T1 + T2)}$$

mit:

$nci$  = *normalized change index*

T1 = Pre- Disaster Amplitudenbild

T2 = Post- Disaster Amplitudenbild

Daraus folgt ein  $nci$  mit einem Wertebereich von -1 bis +1. Null bedeutet keine Helligkeitsveränderung, +1 maximale positive Helligkeitsänderung und -1 maximale negative Helligkeitsänderung. Neben diesen Darstellungen werden auch multitemporale RGB-Kompositen hergestellt um Amplitudenveränderungen der SAR- Bilder sichtbar zu machen. Dazu wird der **Zeitreihen-** (HENDERSON & LEWIS 1998: 168f, WADGE & HAYNES 1998), der **Differenz-** (WADGE et al. 2011: 144) und der **Ratio-** (RIGNOT et al. 1993, WADGE et al. 2002) Ansatz genutzt. Der Zeitreihen Ansatz weist jedem Amplitudenbild einen eigenen Farbkanal zu. So ist auf dem roten Kanal das SAR-Bild vom 26.10.2010 (T1) und auf dem grünen sowie auf dem blauen Kanal das SAR-Bild vom 6.11.2010 (T2). Das resultierende Bild zeigt Bereiche mit Helligkeits-Veränderungen in den Farben: rot (T2 heller T1) oder magenta (T2 dunkler T1) an, unveränderte Pixel erscheinen in Grauabstufungen. Das Farbschema für den Zeitreihen Ansatz zeigt Tabelle 3.1.1, die verwendeten Inputbilder sind in Abbildung 3.1.1 zu sehen. Der Differenzbild Ansatz weist dem roten Kanal das SAR- Amplituden Bild vom 26.10.2010 zu, dem grünen Kanal das SAR- Amplituden Bild vom 6.11.2010 und dem blauen Kanal deren absolute Differenz zu. Eine solche Darstellung macht positive Helligkeitsänderungen in Cyan sichtbar, negative Helligkeitsänderungen in Magenta und unveränderte Bildbereiche sind in Gelb dargestellt (WADGE 2011). Das dazugehörige Farbschema ist in Tabelle 3.1.2 abgebildet, Abbildung 3.1.2 zeigt die verwendeten

Inputbilder. Der Ratio Ansatz weist dem roten Kanal das SAR- Amplitudenbild vom 26.10.2010 (T1), dem grünen Kanal das SAR- Amplitudenbild vom 6.11.2010 (T2) und dem blauen Kanal den NCI- Ratio zu. In Abbildung 3.1.3 sind die verwendeten Inputbilder zu sehen.

Tabelle 3.1.1: Farb Zuweisung und resultierende Farbe für Zeitreihenbilder  
Quelle: verändert nach Henderson & Lewis 1998: 170

Rot: T1	Grün: T2	Blau: T2	Farbe
schwarz	weiß	weiß	rot
weiß	schwarz	schwarz	cyan
weiß	weiß	weiß	grau
schwarz	schwarz	schwarz	grau

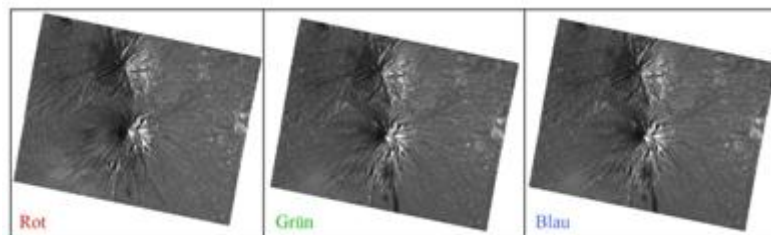


Abbildung 3.1.1: Inputbilder für den Zeitreihen Ansatz (Rot: T1, Grün: T2, Blau: T2)

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 3.1.2: Farb Zuweisung und resultierende Farbe für Differenzbilder

Quelle: verändert nach Henderson & Lewis 1998: 170

Rot: Amplitude 1	Grün: Amplitude 2	Blau: Differenz	Farbe
schwarz	weiß	weiß	cyan
weiß	schwarz	weiß	magenta
weiß	weiß	schwarz	gelb

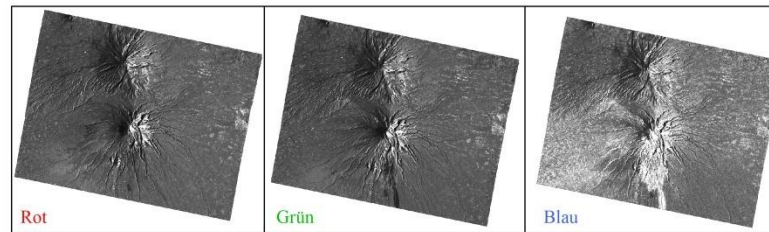


Abbildung 3.1.2: Inputbilder für den Differenz Ansatz (Rot: T1, Grün: T2, Blau: Differenz)  
Quelle: eigene Darstellung

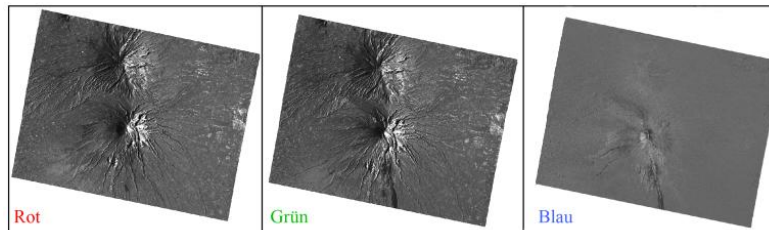


Abbildung 3.1.3: Inputbilder für den Ratio Ansatz (Rot: T1, Grün: T2, Blau: Ratio)  
Quelle: eigene Darstellung

Neben der Amplitude kann auch die Phase genutzt werden, um Veränderungen zu detektieren. Die **Kohärenz** ist ein Maß der Korrelation des Rückstreuerverhaltens der abgebildeten Bodenelemente aus der Übereinstimmung der Phasenposition von zwei SAR-Aufnahmen (LÖFFLER et al. 2005: 233) und folgt der Funktion (TERUNUMA et al. 2010: 1934):

$$r = \frac{|\langle C_m C_s^* \rangle|}{\sqrt{\langle C_m C_m^* \rangle \langle C_s C_s^* \rangle}}$$

mit:

$r$  = Kohärenz

$C_m$  = komplexer Wert des Master SLC Bildes

$C_s$  = komplexer Wert des Slave SLC Bildes

$^*$  = konjugiert komplexer Wert und

$\langle \rangle$  = Durchschnitt der Werte in einem Filterfenster

Die Kohärenz ist somit ein Maß der Phase im Vergleich zum Rauschen über ein Zeitintervall und wird in der Praxis als Karte über die zu erwartende Qualität eines Interferograms genutzt. Die Einflussgrößen der Kohärenz  $r$  zeigt folgende Funktion (ZEBKER et al. 1992):

$$r = r_{\text{temp}} * r_{\text{SNR}} * r_{\text{spec}} * r_{\text{vol}}$$

mit:

$r$  = Kohärenz

$r_{\text{temp}}$  = zeitliche Dekorrelation

$r_{\text{SNR}}$  = Dekorrelation durch thermales Rauschen

$r_{\text{spec}}$  = Spektrale Korrelation

$r_{\text{vol}}$  = Effekt der Volumenstreuung

Jede Veränderung der Aufnahmebedingungen erzeugt Dekorrelation. Der Einfluss der zeitlichen Dekorrelation ist bei der Repeat- Pass- Interferometrie am stärksten (SCHEUCHL et al. 2009). Zur zeitlichen Dekorrelation kommt es z.B. durch geologische Prozesse (viele Jahre), Verwitterung, Regen (Stunden – Jahre), Vegetationsbedeckung (Tage – Wochen), Blätterbewegung durch Wind (Sekunden) oder durch Wasserbewegungen (Sekunden) (HENDERSON & LEWIS 1998: 367).

Bei der Berechnung der Kohärenz wird allerdings nicht pixel für pixel miteinander verglichen sondern die statistischen Analysen finden in einem sogenannten bewegten Fenster (*moving window*) statt. Ein bewegtes Fenster ist ein kleines Quadrat welches über das gesamte Bild bewegt wird. Dabei ist die Größe des bewegten Fensters umgekehrt proportional mit der Auflösung des Kohärenzbildes und dem Fehler der Kohärenzwerte. D.h. ein großes Fenster führt zu einer kleinen Auflösung und einem geringen Fehler (TERUNUMA et al. 2005). In dieser Arbeit wurde eine Fenstergröße von 3 x 3 Pixeln verwendet. Die Kohärenz wurde für das Bildpaar vom 26.10.2010 bis 6.11.2010 mit dem Goldstein Ansatz berechnet.

Eine Möglichkeit um Kohärenz und Amplituden Veränderung in einem multitemporalen RGB-Komposit zu vereinen ist der **Interferometric Signature** Ansatz (WEGMULLER et al. 1999). Dabei wird dem roten Kanal die Kohärenz, dem grünen Kanal der Durchschnitt und dem blauen Kanal die Amplitudendifferenz zugewiesen. Im Gegensatz zu den oben genannten RGB- Kompositen wurde dieses nicht aus den EEC Daten sondern aus den SLC Daten generiert. Die Vorverarbeitung der SLC Daten umfasste ein Multilooking sowie Orthorektifizierung mit SRTM- DEM (siehe Kap. 2.5). Das Farbschema des RGB- Komposit vom Typ Interferometric Signature zeigt Tabelle 3.1.3, die verwendeten Inputdaten Abbildung 3.1.4.

Tabelle 3.1.3: Farb Zuweisung und resultierende Farbe für Interferometric Signature

Quelle: verändert nach Henderson & Lewis 1998: 170

Rot: Kohärenz	Grün: Durchschnitt	Blau: Differenz	
schwarz	weiß	weiß	cyan
weiß	schwarz	weiß	magenta
weiß	weiß	schwarz	gelb
weiß	schwarz	schwarz	rot
schwarz	weiß	schwarz	grün
schwarz	schwarz	weiß	blau

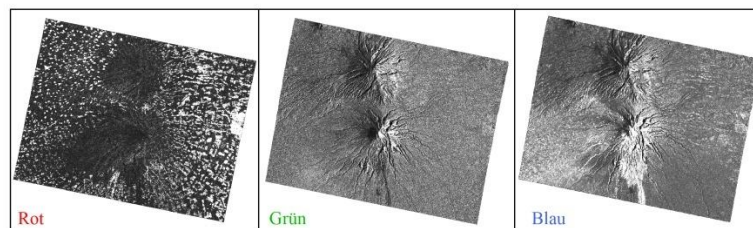


Abbildung 3.1.4: Interferometric Signatures Ansatz (Rot: Kohärenz, Grün: Durchschnitt, Blau: Differenz) Quelle: eigene Darstellung

### 3.1.2 Ergebnisse

Das Ergebnis der Differenz- bzw. Ratio- Berechnung zeigt Abbildung 3.1.5. Beide Ergebnisse sind im gleichen Maßstab und haben einen reskalierten Wertebereich von 0 bis 255. Zu sehen ist ein Bereich mit Helligkeitsänderung am Kali Gendol. Die Differenzdarstellung zeigt Veränderungen in weiß an, Bereich ohne Helligkeitsänderung erscheinen schwarz. Die NCI Darstellung zeigt unveränderte Gebiete in grau, und positive Veränderungen in weiß, bzw. negative Änderungen in schwarz an. Somit lässt sich beim NCI im Gegensatz zur Differenz zwischen positiven und negativen Helligkeitsänderungen unterscheiden. Auch zeigt sich, dass das Differenzbild körniger als das NCI Bild ist. Dieses Phänomen hängt mit der multiplikativen Natur des Speckle zusammen, was bedeutet, dass sich der Ratio besser zum Vergleich multitemporaler SAR- Amplituden Bilder eignet. Zu diesem Urteil kamen auch RIGNOT & VAN ZYL (1993) bei ihren Studien. Interessant ist auch, dass der NCI eine Helligkeitsänderung am nördlichen Ende des Golfplatzes registrierte, während die Differenz dies nicht tat.



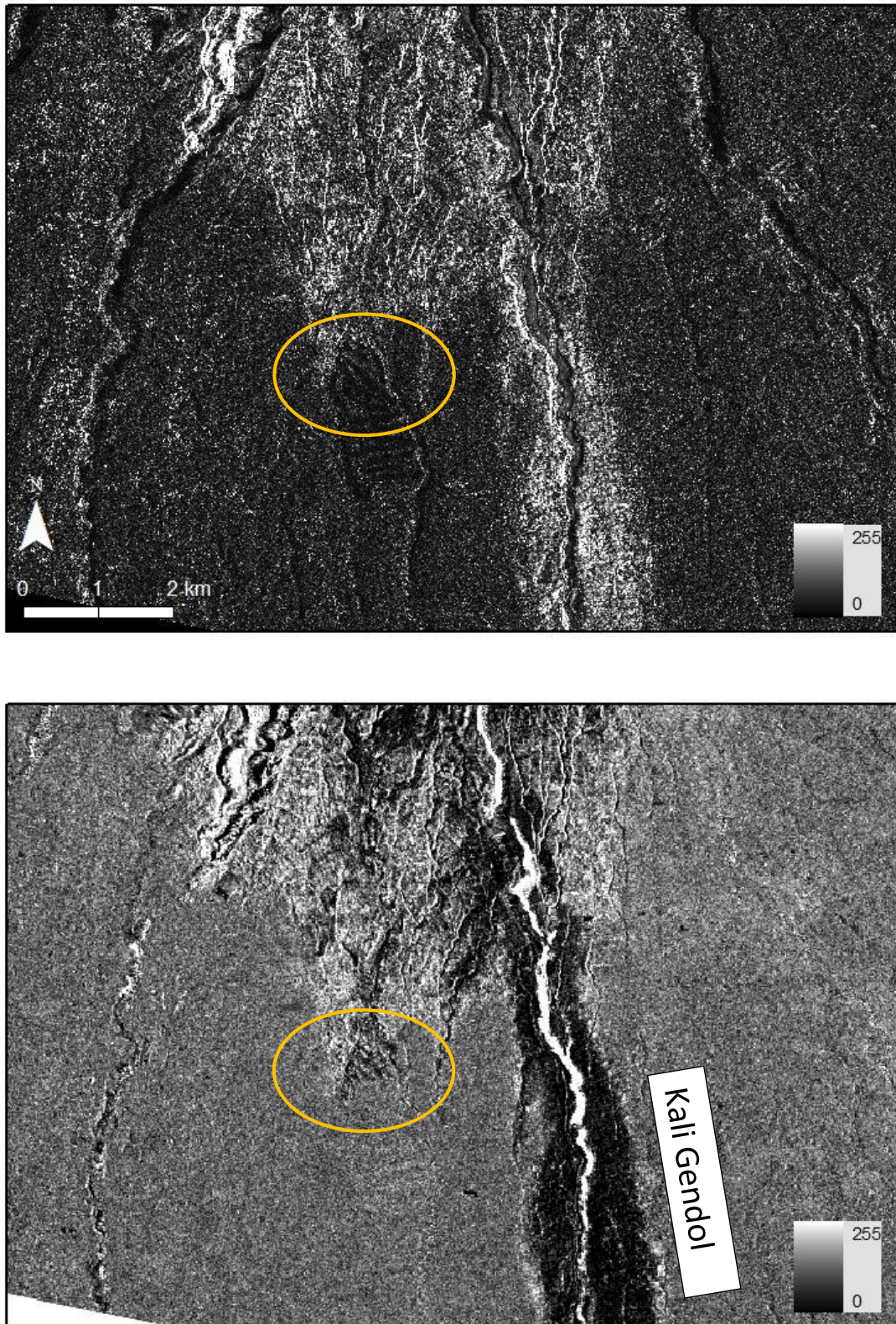


Abbildung 3.1.5: Ergebnisse der Differenzberechnung (oben) und NCI- Berechnung (unten)

Quelle: eigene Darstellung



Das Ergebnis der Kohärenz- Berechnung zeigt Abbildung 3.1.6. Bereiche mit niedriger Kohärenz sind schwarz, während solche mit hoher Kohärenz weiß dargestellt sind. Zur Orientierung sind Isohypsen mit einem Höhenunterschied von je 200 m eingezeichnet (beginnend mit 400 m ü. NN.). Man erkennt sehr viele kleine bis mittlere Gebiete mit hoher Kohärenz, welche unterbrochen sind von Gebieten mit geringer Kohärenz. Die steilen Regionen des Merapi, bzw. des Merbabu, weisen eine überwiegend geringe Kohärenz auf. Aufgrund der geringen Kohärenz war es nicht möglich, Veränderungsbereiche der Erdoberfläche ausgelöst durch den Vulkanausbruch 2010 mittels Kohärenzveränderungsdetektion (CCD) zu detektieren.

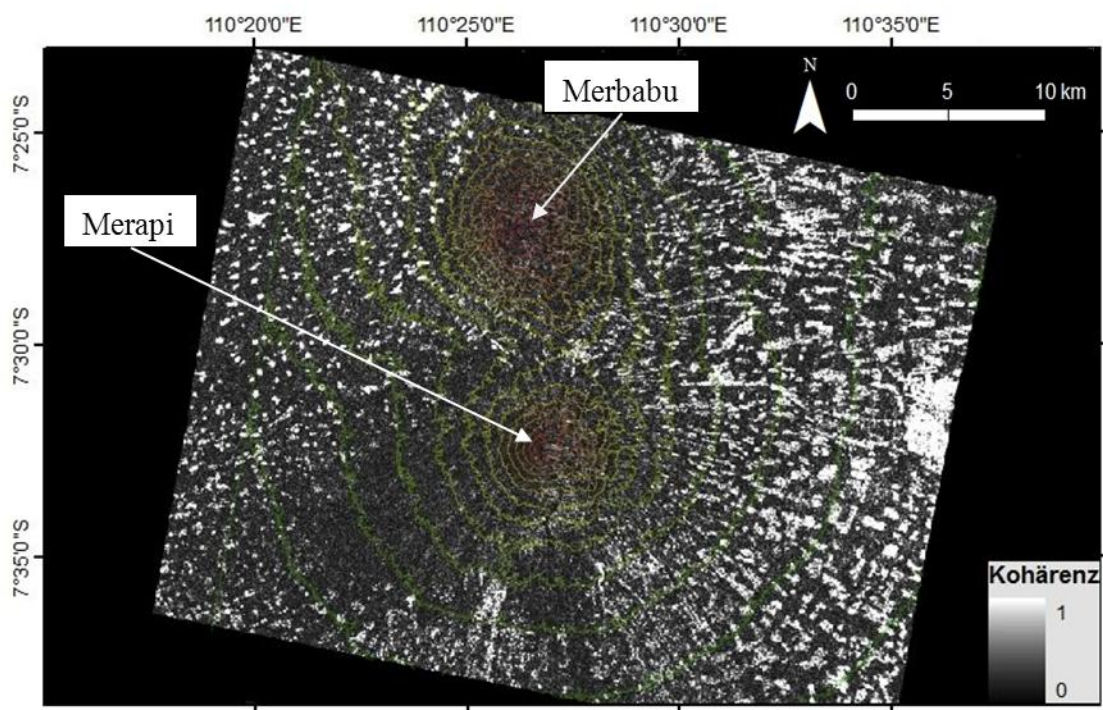


Abbildung 3.1.6: Kohärenz zwischen dem 26.10.2010 bis 6.11.2010 und Isohypsen

Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 3.1.7 sind die Ergebnisse der einzelnen Methoden der Veränderungsdetektion dargestellt. Die dunkler gewordenen Bereiche sind auf den Kompositen A, B, C in Rottönen dargestellt, die heller gewordenen in Cyantönen. Allerdings werden sie bei der Differenzdarstellung am deutlichsten visuell erkennbar, da der farbliche Kontrast zwischen veränderten und nicht veränderten Bereichen am stärksten ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 3.1.7 B). Auffällig ist außerdem ein heller Bildbereich west- südwestlich des Gipfels des Merapi sowohl bei der Differenz- als auch bei der Interferometric Signatures- Darstellung,

der bei den Zeitserien- und Ratio Auswertungen nicht erkennbar ist. Die Ursache dafür ist unbekannt.

Auf dem Ergebnisbild D, der Interferometric Signatures- Darstellung, sind sowohl positive als auch negative Helligkeitsänderungen in Blautönen dargestellt. Zwischen heller und dunkler gewordenen Bereichen kann also nicht unterschieden werden. Allerdings sind in dieser Darstellung hochkohärente Bereiche in Rottönen erkennbar. Diese Gebiete mit hoher Kohärenz sind hauptsächlich Siedlungen zuzuordnen, da die anderen Bildbereiche der abgebildeten Erdoberfläche eine hohe Vegetationsdichte bzw. eine hohe Erosionsrate aufweisen und deshalb eine niedrige Kohärenz aufweisen. Das Ergebnis der Interferometric Signature ist zusammenfassend eine Darstellung, deren visueller Eindruck, dem eines Farbluftbildes ähnelt. Siedlungen werden hellgelb, Wälder grün und Wasserflächen, bzw. Bildbereiche mit Helligkeitsänderung, blau dargestellt (LÖFFLER et al. 2005: 235)

Während die Studie von TERUNUMA et al. (2005) den Vorteil der Kohärenz im Vergleich zur Amplitude zur Veränderungsdetektion zeigten konnte dies in dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Dies liegt einerseits an der starken Vegetationsbedeckung bzw. Erosion in dieser Region und andererseits am elf Tage Zeitintervall. Diese führten zu einer hohen zeitlichen Dekorrelation und damit zu einer geringen Kohärenz. Allerdings hat sich die Kombination von Kohärenz und Amplitude in Form der Interferometric Signature Darstellung als gewinnbringend herausgestellt, da sowohl Veränderungsbereiche als auch Landbedeckungsinformationen in dieser Darstellung deutlich werden (siehe Abbildung 3.1.7 D).



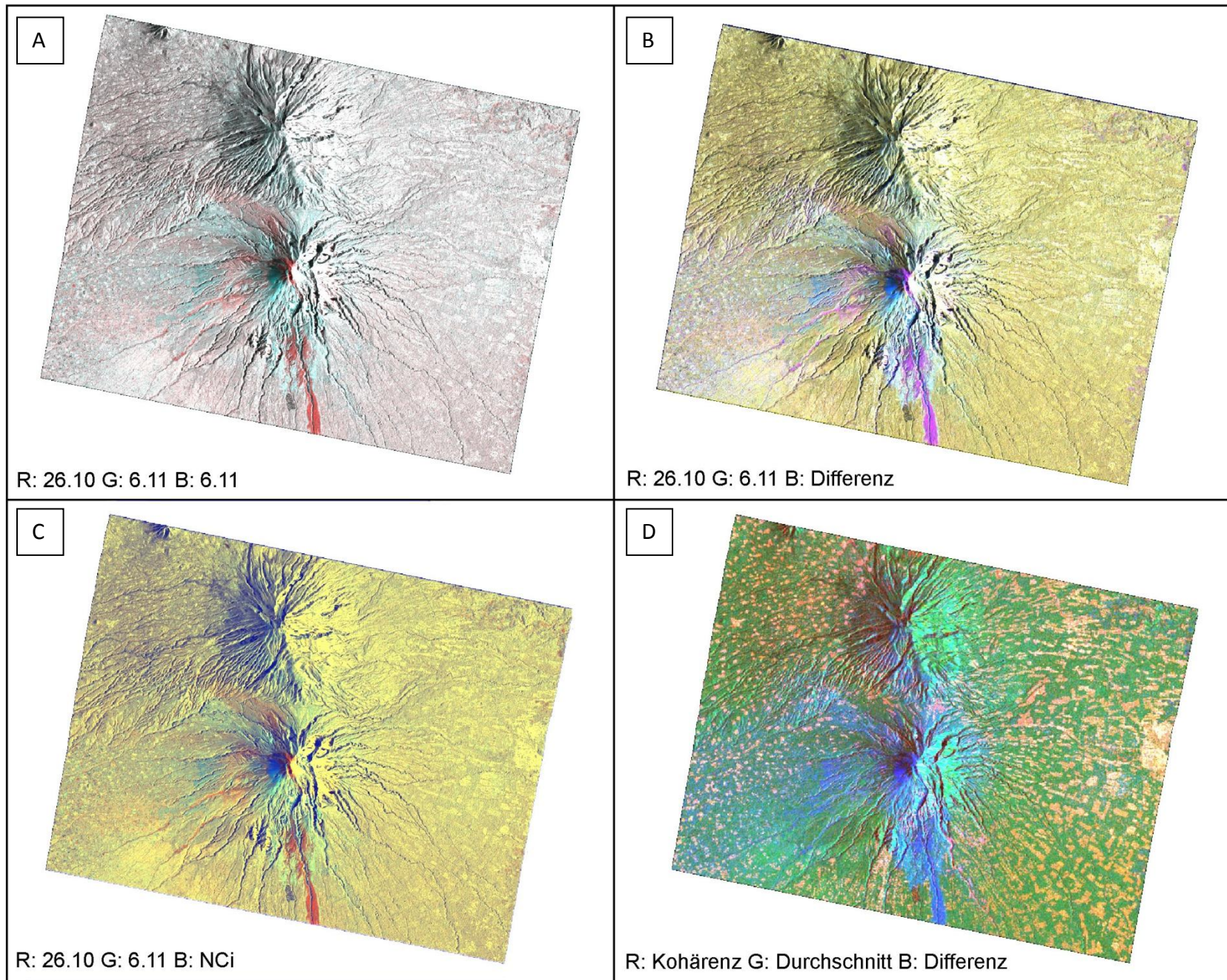


Abbildung 3.1.7:  
Veränderungsdetektions-  
Ergebnisse (A: Zeitserie, B:  
Differenz, C: Ratio, D:  
Interferometric Signature)  
Quelle: eigene Darstellung

## 3.2 Bildinterpretation

Im folgenden Abschnitt werden sowohl einzelne SAR-Bilder als auch die multitemporalen RGB-Komposite visuell interpretiert. Ziel ist es, Veränderungen der Erdoberfläche, ausgelöst durch pyroklastische Stromablagerungen, zu erfassen. Um solche Veränderungen der Erdoberfläche identifizieren zu können, werden Helligkeitsänderungen, Textur, Form, und Größe für die Interpretation genutzt.

### 3.2.1 Methoden

Das Wissen über objektspezifische Reflexionseigenschaften (Oberflächenrauigkeit, Dielektrizitäts Konstante) ist essentiell für die Bildinterpretation. Da im Rahmen dieser Arbeit keine eigenen Felduntersuchen zur objektspezifischen Reflexionseigenschaft pyroklastischer Stromablagerungen am Merapi durchgeführt werden konnten, wird hier auf eine Studie von WADGE et al. (2011) zurückgegriffen. Seine Studie zeigt objektspezifische Reflexionseigenschaften pyroklastischer Ströme an den Soufriere Hills auf Montserrat (Karibik). Nach einer mündlichen Aussage von Francois BEAUDUCEL, (2011), sind die Soufriere Hills und der Merapi sehr ähnlich in ihrem Vulkanismus, wenn auch der Eruptionszyklus (Dom Aufbau/Kollaps) an den Soufriere Hills schneller als beim Merapi abläuft. Somit wird in dieser Arbeit davon ausgegangen dass auch die objektspezifischen Reflexionseigenschaften der pyroklastischen Ströme auf den Soufriere Hills mit denen des Merapi bis zu einem gewissen Grad miteinander vergleichbar sind.

WADGE et al. (2011) differenzieren in ihrer Studie, analog zu SCHMINCKE (2011), pyroklastische Stromablagerungen in Block & Aschestrom- Ablagerung und in Surge- Ablagerungen. Wobei sich Block & Aschestrom- Ablagerungen nur in topographisch niedrigen Bereichen (Flussbett) befinden, sich während sich Surge- Ablagerungen auch an topographisch höher gelegenen Bereichen befinden (siehe Abbildung 3.2.1). Die mittlere Oberflächenrauigkeit eines beobachteten Bereiches ändert sich nach einem pyroklastischen Strom auf folgenden Weise (WADGE et al. 2011): Die topographisch niedrigen Gebiete zeigen im Vergleich zur Pre- Disaster Situation eine rauere Oberfläche, während höher gelegene Gebiete eine glattere Oberfläche aufweisen. Die rauere Oberfläche erklärt WADGE et al. (2011) durch einzelne große Blöcke, die aus einer Asche Matrix „herausschauen“ (siehe Abbildung 2.3.1 & Abbildung 3.2.1). Die glattere



Oberfläche wird hingegen durch die kleine Korngröße der Surge- Ablagerungen (Asche) erklärt. Dadurch, dass erosive Prozesse im zeitlichen Verlauf die glatte Oberfläche in höher gelegenen Gebieten zunehmend zerschneiden, erscheinen diese nach einiger Zeit auf dem SAR- Bild als rau. Der umgekehrte Fall tritt auf bei den Block & Aschestrom- Ablagerungen in niedrigeren Gebieten, denn dort wird durch Sedimentation hauptsächlich feineres Material abgelagert. Die Folge ist eine Verringerung der Oberflächenrauigkeit und ein dunklerer Bildbereich (siehe Abbildung 3.2.1). Somit dreht sich die Helligkeitsänderung zwischen Block & Ascheablagerungen und Surge Ablagerungen im Zeitverlauf um. Dies wird beim Betrachten der multitemporalen RGB- Komposite vom Typ Differenz, die WADGE et al. (2011) in Ihrer Studie zeigen deutlich (siehe Abbildung 3.2.1, B1 und C1). Sie stammen von einem Flussbett namens Spring Ghaut auf Montserrat und wurden am 17.11.2009 & 29.11.2009 (B1) und 28.11.2009 & 9.12.2009 im SpotLight Modus aufgenommen. In Magenta sind negative Helligkeitsänderungen angezeigt, während positive in Cyan angezeigt werden.

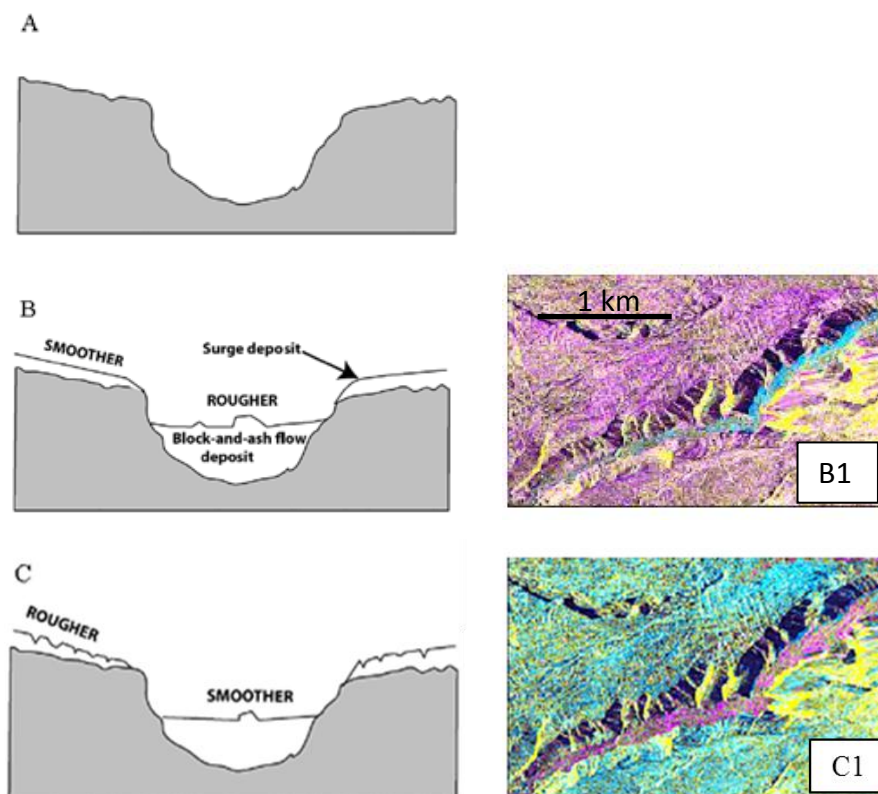


Abbildung 3.2.1: A) Situation vor Pyroklastischem Strom, B) Situation nach Pyroklastischem Strom C) Situation nach Erosion B1) Differenzbild 17.11.2009 & 29.11.2009 C1) Differenzbild 28.11.2009 & 9.12.2009

Quelle: WADGE et al. 2011: 143ff

Zusätzlich zur Detektion pyroklastischer Ströme, die einen Gefahrenbereich darstellen, liegt der Fokus auf dem Erkennen von Siedlungen und Straßen. Dies geschieht durch Interpretation der Helligkeit, Textur und Form der Rückstreuer. So zeigen sich bspw. Gebäude durch den in Kapitel 2.1.2 erwähnten *double bounce* Effekte als sehr helle und punktförmige Rückstreuer im SAR-Bild. Straßen hingegen sind als lineare Strukturen zu erkennen. Weiterhin werden durch Interpretation der Schatten Rückschlüsse auf die Morphologie vorgenommen.

### 3.2.2 Ergebnisse

Abbildung 3.2.2. zeigt einen etwa 800 m \* 1300 m großen Bereich eines Südhangs am Merapi. Der Bildausschnitt umfasst einen Höhenbereich von etwa 975 m über NN bis 1150 m ü. NN. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines multitemporalen RGB- Komposit vom Typ Differenz (siehe Inset oben links). Die dafür verwendeten Aufnahmen stammen vom 4.11.2010 und 15.11.2010 und wurden im SpotLight Modus aufgenommen. Auf Ihnen sind Isohypsen mit einem Höhenunterschied von je 12,5 m abgebildet. Sie zeichnen die Flussläufe des Kali Gendol und Kali Opak in etwa nach.

Das Differenz- Bild zeigt großflächige Magenta farbige Bereiche durchzogen von Cyan farbigen Strukturen und kleinräumigen gelben Bereichen. Layover- oder Shadow- Bereiche sind auf wenige dem Sensor zu- bzw. abgewandte steile Hänge begrenzt. Die Farbverteilung cyan ( $T_1 < T_2$ , „heller geworden“) im Flussbett und magenta ( $T_1 > T_2$ , „dunkler geworden“) an angrenzenden Hängen entspricht den Beschreibungen Situation nach einem pyroklastischen Strom nach der Studie von WADGE et al 2011. Zwischen den Aufnahmezeitpunkten kam es zu zahlreichen Pyroklastischen Strömen auf der abgebildeten Erdoberfläche. Diese bewirkten eine nahezu flächendeckende Änderung der gemessenen Rückstrahlintensität (dargestellt in cyan oder magenta). Es ist also davon auszugehen, dass die abgebildete Erdoberfläche eine große Veränderung in der Landbedeckung erfahren hat. Diese führte zu einer wesentlich anderen Reflektionseigenschaft, welche durch das multitemporale RGB- Komposit sichtbar gemacht wurde. Durch Interpretation der Helligkeitsänderung ist es weiterhin möglich, Rückschlüsse auf die vulkanbedingten Prozesse der Erdoberfläche zu ziehen.



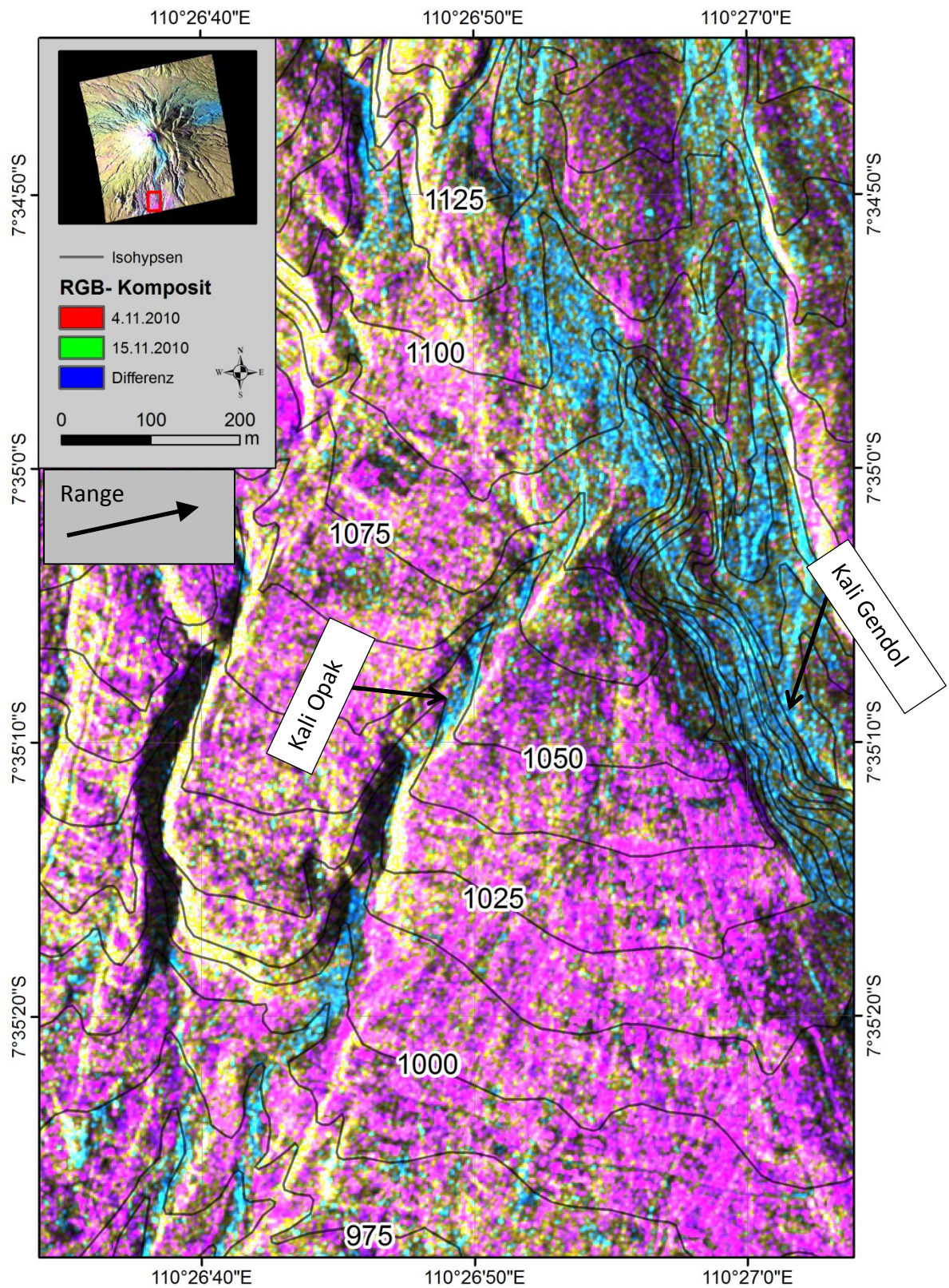


Abbildung 3.2.2: Multitemporales RGB- Komposit Typ Differenz 4.11.2010 & 15.11.2010 am Merapi mit überlagerten Isohypsen Quelle: eigene Darstellung, Isohypsen: BAPPEDA



Abbildung 3.2.3 zeigt dasselbe Bild wie Abbildung 3.2.2 allerdings in einem größeren Maßstab. Darüber hinaus sind die verwendeten Pre- und Post- Desaster Szenen (Nr. 2a,b; Nr. 3a,b) für die markierten Bildausschnitte auf der rechten Bildhälfte abgebildet.

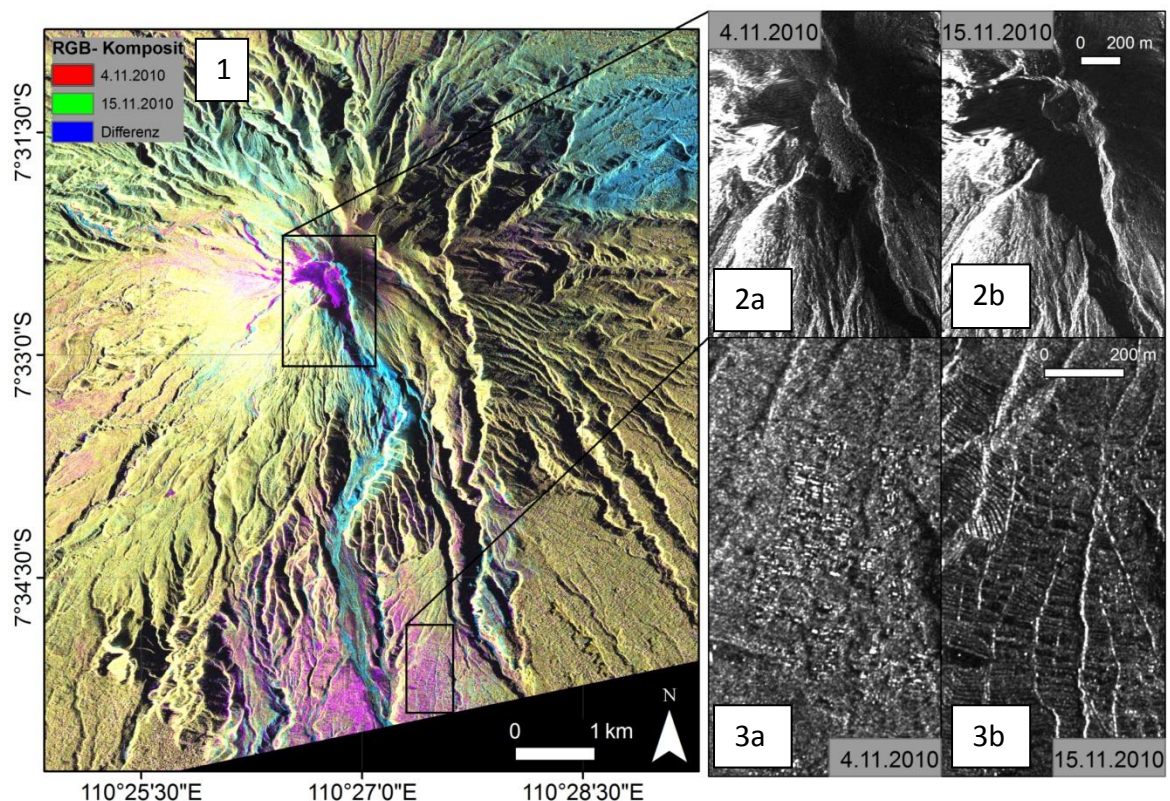


Abbildung 3.2.3: Multitemporales RGB- Komposit vom Typ Differenz 4.11.2010 & 15.11.2010 (links, Nr. 1) und Pre- (a) und Post- (b) Desaster Aufnahmen (rechts, Nr. 2, Nr. 3) Quelle: eigene Darstellung

Das RGB- Komposit vom Typ Differenz (siehe Abbildung 3.2.3) zeigt in der Bildmitte den Gipfel des Merapi in Magenta. Die Ursache für diese negative Helligkeitsänderung ist auf der rechten Seite der Abbildung bei den Inset Nr. 2a und Nr. 2b zu erkennen. Während ein Vulkandom im Pre- Desaster Bild (2a) zu einer Reflektion der Mikrowellen führte (hell), ist dieser im Post- Desaster Bild (2b) verschwunden und durch einen verlängerten Radarschatten (dunkel) an der Stelle ersetzt worden. Dies bedeutet, dass der im Pre- Desaster Bild vorhandene Vulkandom zwischen dem 4.11.2010 und dem 15.11.2010 kollabiert ist. Tatsächlich ist dies durch Meldungen des CVGHM bestätigt worden.

Südlich des Gipfels befindet sich ein länglicher Bereich in Cyan. Die hellere Farbe im Post-Desaster Bild und die Lage im Flussbett machen Block & Ascheablagerungen, wie in Kapitel 3.2.1 und weiter oben in diesem Kapitel erläutert, als Ursache für die Helligkeitsveränderung wahrscheinlich. Dies bedeutet, dass große Blöcke zu einer Vergrößerung der Oberflächenrauigkeit in diesem Bereich führten und damit zu einem helleren Pixel im SAR- Bild. Im südlichen Drittel der Cyan farbigen Struktur sind von diesem ausgehende, Magenta farbige Bereiche erkennbar. Es ist wahrscheinlich, dass diese von Ascheablagerungen eines Surge stammen, da sie, wie von WADGE et al. (2011) beschrieben, in topographisch höheren Gebieten liegen. Für einen Surge mit hohen Temperaturen spricht eine Betrachtung der Pre- und Post- Desaster Szenen (Inset Nr. 3a, Nr. 3b) in diesem Bereich. So sind in der Pre- Desaster Szene einzelne sehr helle Punktstreuer, umgeben von einem Bereich mit diffuser Streuung, zu erkennen. Die Punktstreuer stammen wahrscheinlich von Gebäuden und die diffuse Streuung von einem Blätterdach. Die Post- Desaster Szene zeigt ein deutlich verändertes Reflektionsverhalten, es ist von spiegelnder Reflektion und hellen linearen Strukturen geprägt. Sowohl die diffuse Streuung als auch die Punktstreuer sind zu einem Großteil nicht mehr erkennbar. Wahrscheinlich wurde die Baumvegetation durch Block & Ascheströme und Surges zerstört und durch eine glatte Oberfläche ersetzt, was zu einer spiegelnden Reflektion führte. Die hellen linearen Strukturen scheinen von hangparallelen Terrassen zu stammen, die im Pre- Desaster Bild von einem Blätterdach verdeckt waren. Neben diesen sind es vermutlich kleine Flussläufe deren Morphologie zu hellen linearen Strukturen in Fallrichtung des Hangs führen.

Weiterhin ist in Abbildung 3.2.3 etwa Ostnordöstlich des Gipfels eine Cyan farbige Fläche zu erkennen. Diese ist auf einen dunklen Bildbereich durch Regenschatten im Pre-Desaster Bild zurückzuführen.

Die StripMap Szene vom 6.11.2010 (vgl. Abbildung 3.2.4) zeigt im oberen Bildabschnitt den Merapi. Seine steilen in Range- Richtung exponierten Hänge sind vom *layover* Effekt betroffen und sehen daher „überstrahlt“ aus. Die steilen westexponierten Hänge liegen im Radarschatten und sind daher dunkelgrau bis schwarz. Sie sind besonders am Gipfel des Merapi zu erkennen. Zahlreiche Täler sind durch ihren Schattenwurf erkennbar. Sie

erzeugen ein sichtbares radiales Flusssystem, welches für Vulkane oft typisch ist (Löffler et al. 2005: 151). Süd-Südwestlich des Merapi ist die Stadt Yogyakarta durch zahlreiche helle Rückstreuer zu erkennen. Diese entstehen durch den double bounce Effekt an Gebäuden (siehe Kapitel 2.1). Ebenfalls ist dort die Landebahn des Flughafens von Yogyakarta als längliche west-ost verlaufende Struktur zu erkennen. Durch den glatten Asphalt werden dort die Mikrowellenstrahlen spiegelnd reflektiert, was zu dunklen Pixeln im SAR-Bild führt.

Das rechte Inset in Abbildung 3.2.4 zeigt eine dunkle längliche Struktur. Sie könnte durch Schattenwurf, feuchten Boden oder eine glatte Oberfläche verursacht sein. Aufgrund der Lage, Form, Textur sowie Meta- Informationen des CVGHM und Pressefotos ist jedoch eine glatte Oberfläche durch einen pyroklastischer Strom als Ursache wahrscheinlich. Dafür spricht auch eine Aufnahme des ASTER Sensors vom 30.9.2010, wo eine thermale Signatur ausgehend von einem pyroklastischen Strom an derselben Stelle detektiert wurde (siehe Abbildung 3.2.5).

Am 5.11.2010 ereignete sich laut Angaben des CVGHM abermals ein großer pyroklastischer Strom am Kali Gendol. Diesen zeigt die TerraSAR-X Aufnahme vom 6.11.2010. Er erreicht auf dem SAR- Bild eine Länge von 15 km. Das Inset zeigt außerdem Isohypsen von 400 m. ü. n. N. bis 1200 m. ü. n. N. an. So ist erkennbar, dass sich der pyroklastische Strom bis auf etwas unter 400 m. ü. n. N. erstreckt. Im oberen Abschnitt bis etwa 800 m. ü. n. N. ist der pyroklastische Strom sehr breit und besitzt neben einer inneren dunklen Fläche eine helle äußere Fläche. Diese wird besonders durch die Differenzdarstellung (Inset unten links) in Cyan sichtbar. Die äußere helle Fläche wird vermutlich durch Reflektion der Mikrowellen an Baumstämmen (deren Blätterdach durch hohe Surge Temperaturen verbrannt ist) verursacht. Im mittleren Abschnitt des pyroklastischen Stroms (von 800 m. ü. n. N. bis 500 m. ü. n. N.) ist ein heller Randbereich nahezu nicht mehr vorhanden. Unter etwa 500 m. ü. n. N. ist der pyroklastische Strom auf das Flussbett begrenzt und ein heller Randbereich ist nicht mehr erkennbar.



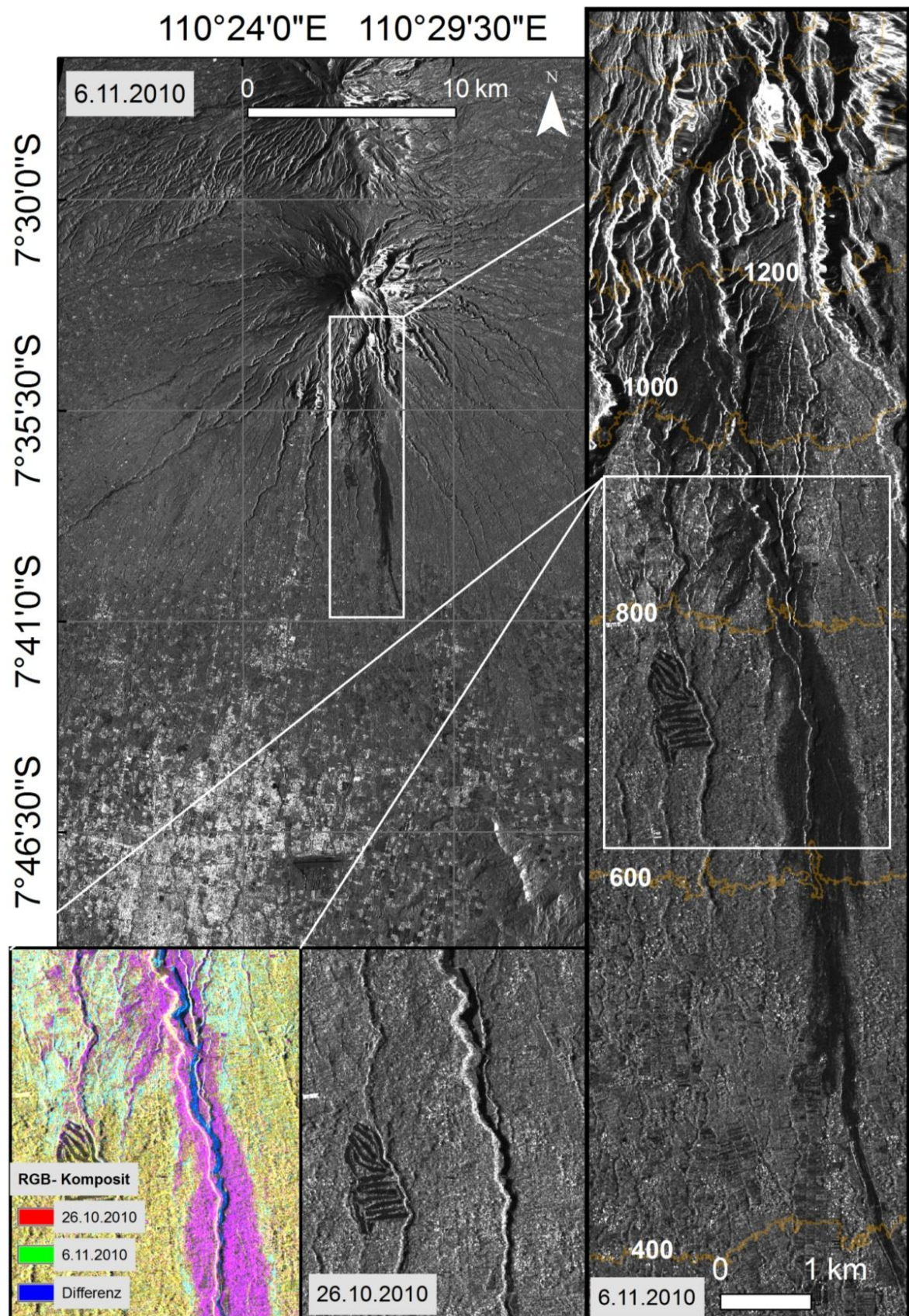


Abbildung 3.2.4: Bildinterpretation der StripMap Szene vom 6.11.2010

Quelle: eigene Darstellung

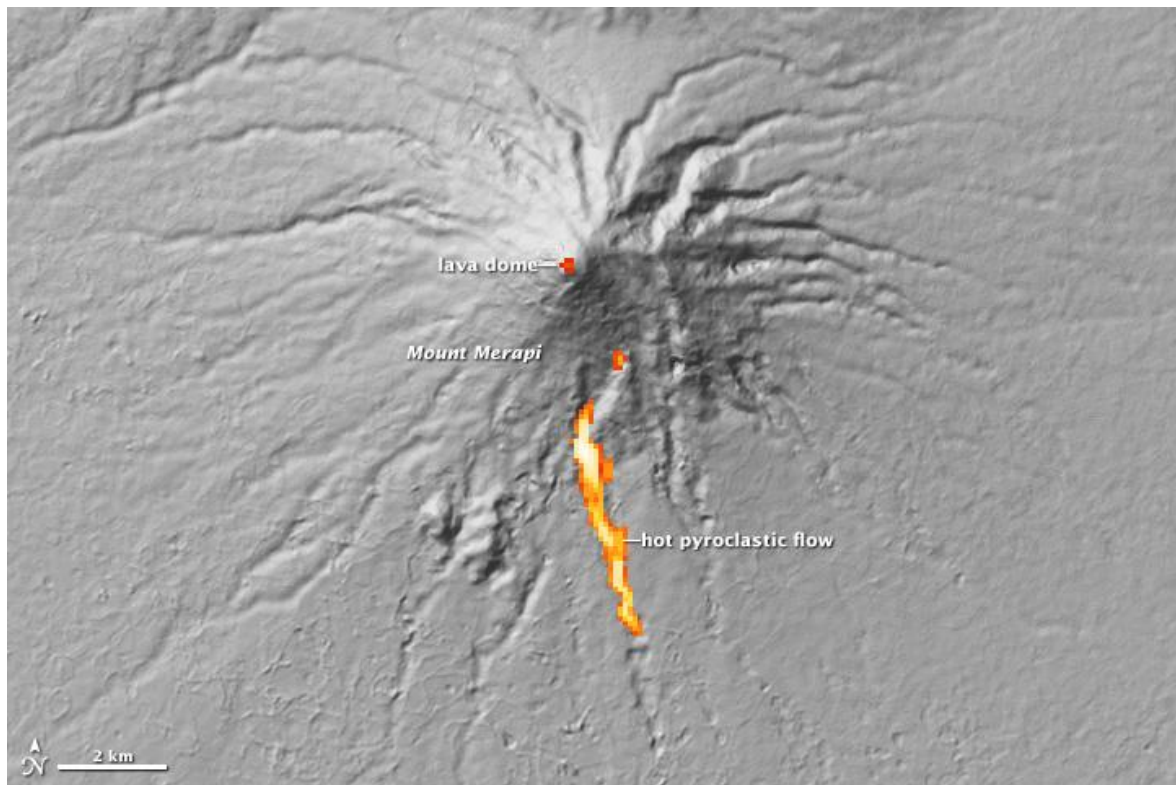


Abbildung 3.2.5: ASTER basierte Thermale Signatur des Merapi vom 30.9.2010 auf einem ASTER-DEM Quelle: NASA

Das in Abbildung 3.2.6 gezeigte multitemporale RGB- Komposit vom Typ Differenz zeigt Veränderungsbereiche in Cyan und Magenta an. Diese Bereiche sind vor allem im Süden, Südwesten und Nordwesten des Merapi anzutreffen. Ein Teil dieser Veränderungen ist vermutlich auf Ascheablagerungen, welche zu unterschiedlichen Zeiten unter verschiedenen Windrichtungen abgelagert worden sind, zurückzuführen. Diese These wird nach einer mündlichen Aussage von Dr. David Schneider (2011) vom vulkanologischen Observatorium aus Anchorage geteilt. Neben Ascheablagerungen und dem oben erwähnten pyroklastischen Strom am Südhang, sind bspw. Veränderungen durch Lahare (Schlammströme), Erdbeben oder landwirtschaftlicher Aktivität (Ernte) als Ursache für Helligkeitsänderungen denkbar. Eine Unterscheidung, welche Ursache für eine beobachtete Helligkeitsveränderung verantwortlich ist, ist ohne Feldvergleich schwer möglich und mit Unsicherheiten behaftet. Mit diesem Hintergrundwissen wird ein Gebiet südlich und südwestlich des Merapi im Folgenden näher betrachtet (gepunktete Rechtecke in Abbildung 3.2.6).



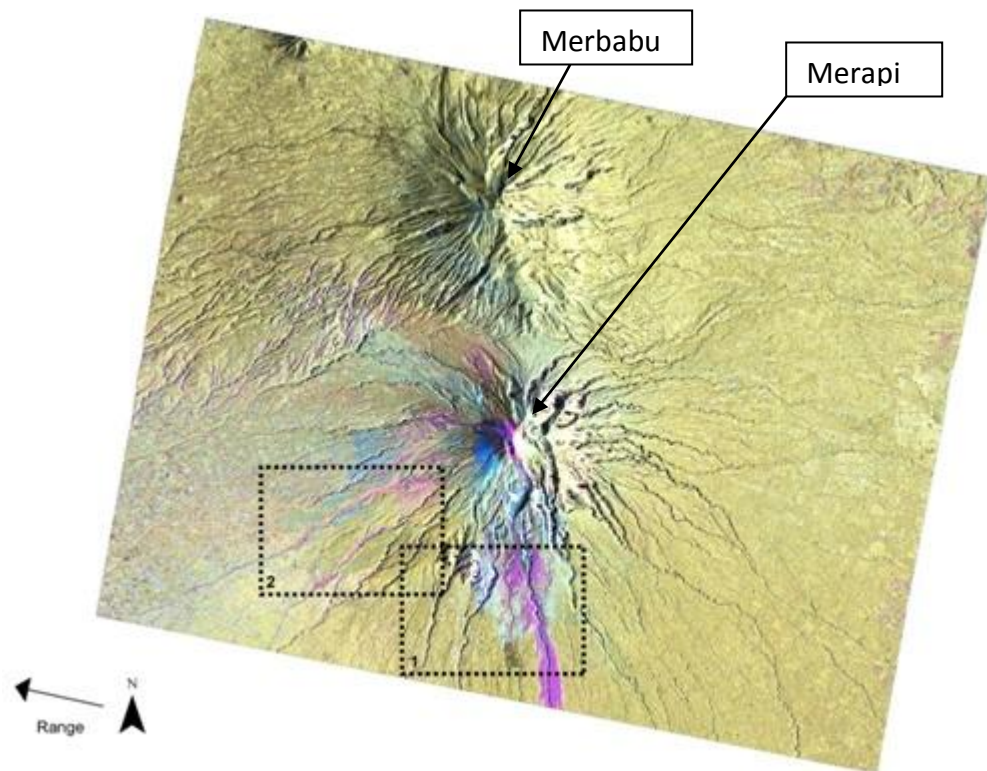


Abbildung 3.2.6: Multitemporales RGB- Komposit vom Typ Differenz 26.10.2010 & 6.11.2010 Quelle: eigene Darstellung

Bildausschnitt eins (Abb 3.2.7) zeigt den Südhang des Merapi. Auf diesem sind Ablagerungen des oben erwähnten pyroklastischer Stroms in der rechten Bildhälfte zu erkennen. Sie sind durch dunkler gewordene Bereiche (dargestellt in Magenta, Punkt 1) und heller gewordene Bereiche (Blau in Punkt 2 und Cyan in Punkt 3) erkennbar. Die dunkler gewordene Bereiche sind wahrscheinlich durch Block & Asche Ablagerungen entstanden. Heller gewordene Bereiche dargestellt in blau (Punkt 2) sind durch verkürzte Schatten im Post- Desaster Bild entstanden. Sie wurden wahrscheinlich durch Sedimentation und somit Talauffüllung verkürzt. Heller gewordene Bereich im Punkt 3 sind vermutlich durch Surge Ablagerungen entstanden. Sie entstanden wahrscheinlich, wie oben erwähnt, durch eine heiße Glutwolke welche Teile der Vegetation zerstörte. So sind, nach dieser These, die Blätter verbrannt aber die Baumstämme stehen geblieben. Dies verursacht eine stärkere Rückstreuung durch die Baumstämme im Post- Desaster Bild als es die diffuse Rückstreuung durch das Blätterdach im Pre- Desaster Bild vermochte. Punkt 4 und Punkt 5 zeigen kleinräumige Helligkeitsänderung, deren Ursache



unbekannt ist. Punkt 6 zeigt layover Bereiche ohne Bildinformationen und Punkt 7 den relativ glatten Rasen eines Golfplatzes.

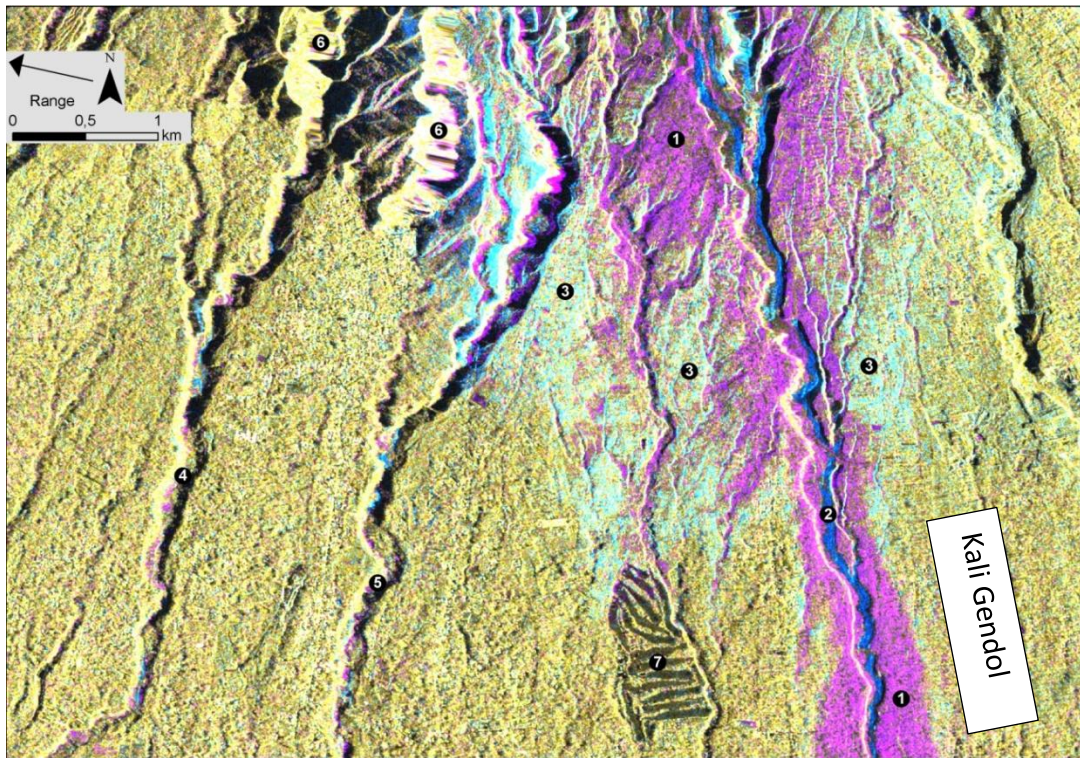


Abbildung 3.2.7: Bildausschnitt 1 Quelle: eigene Darstellung

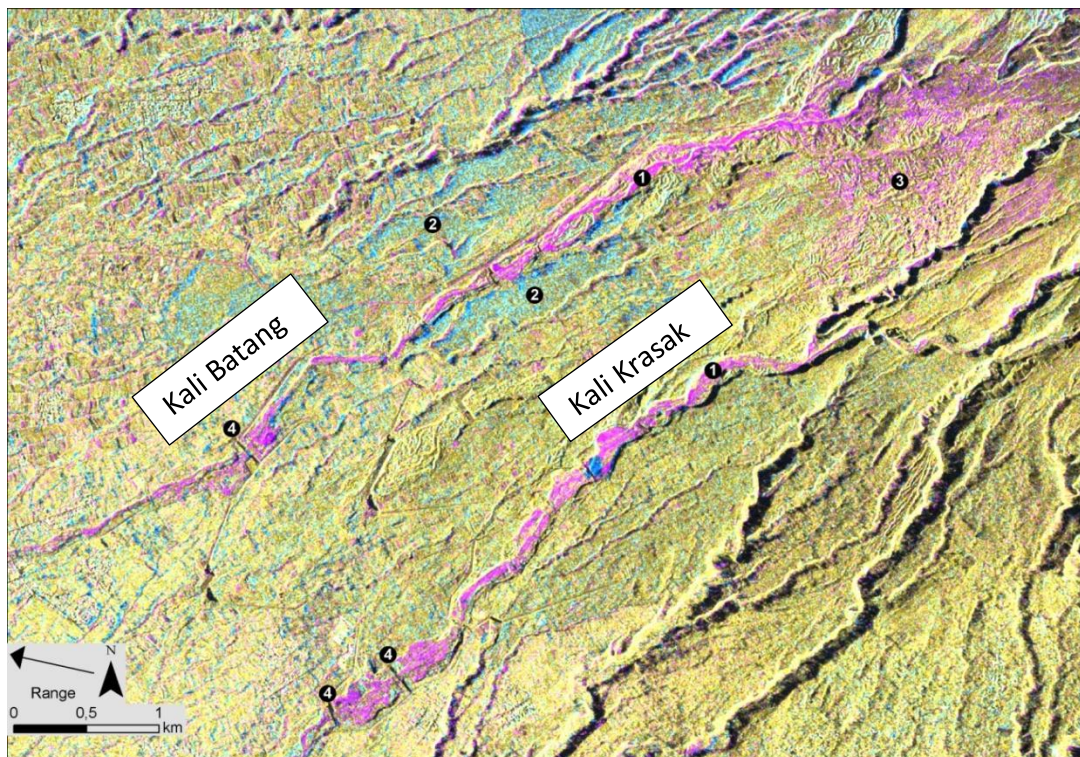


Abbildung 3.2.8: Bildausschnitt 2 Quelle: eigene Darstellung



Im zweiten Bildausschnitt (Abbildung 3.2.8) sind zwei längliche, Magenta farbige Strukturen zu erkennen (Punkt 1). Außerdem eine Magenta farbige Fläche in der oberen rechten Bildecke (Punkt 3) und Cyan farbige Bereiche in der oberen Bildmitte (Punkt 2). Weiterhin sind lineare Objekte, die quer zu den länglichen Magenta farbigen Strukturen verlaufen, zu erkennen (Punkt 4). Punkt eins sind die Flussläufe des Kali Krasak bzw. Kali Batang, sie haben in der Post- Desaster Aufnahme an Helligkeit verloren, dadurch erscheinen Sie in dieser Darstellung in Magenta. Ob es sich dabei um die Ablagerungen von Block und Asche Strömen oder um Lahar Ablagerungen handelt lässt sich ohne Feldinformationen nicht eindeutig klären. Punkt zwei hat im Gegensatz zu Punkt eins an Helligkeit zugenommen und erscheint daher als Cyan farbige Fläche. Diese könnten bspw. durch Surge Ablagerungen hervorgerufen sein. Punkt drei zeigt das Gendol Fumarolen Feld an, es zeigt eine negative Helligkeitsveränderung im Post- Desaster Bild an, deren Ursache unbekannt ist. Punkt 4 zeigt sogenannte *Sabo* Dämme an.

### *Interferometric Signatures*

Die Interferometric Signature Darstellung zeigt Gebiete mit hoher Kohärenz in orange bzw. pink an. Die hohe Kohärenz wird hauptsächlich durch Gebäude oder durch vegetationsfreie Flächen ohne Erosion verursacht. Gebiete mit Helligkeitsveränderung werden in der Farbe Blau angezeigt. Alle übrigen Gebiete sind in grün dargestellt.

Man erkennt auf Abbildung 3.2.9 viele Siedlungsflächen aufgrund der orangen Farbe. Besonders östlich des Vulkans sind größere Siedlungsflächen zu erkennen. Auch die Siedlungen zwischen Merapi und Merbabu sind erkennbar. Am Südhang des Merapi ist die Stadt Kaliurang sichtbar. Die Veränderungsbereiche (blau) sind am stärksten am Südhang sowie am Gipfel erkennbar. Am Westhang des Merapi sowie am Südhang des Merbabu sind leicht blaue Bereiche erkennbar. Vermutlich sind sie durch Ascheablagerung hervorgerufen.

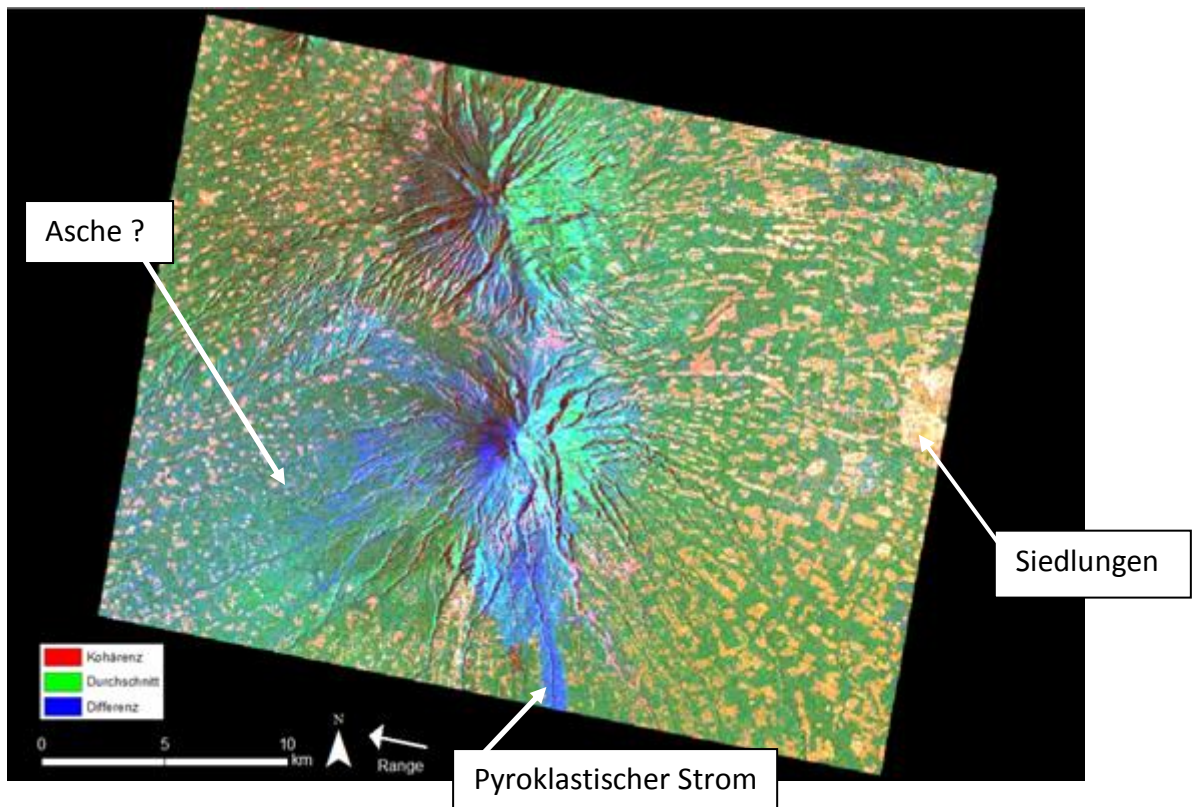


Abbildung 3.2.9: Interferometric Signature 26.10.2010 & 6.11.2010

Quelle: eigene Darstellung

### 3.3 Klassifikation der Gefahrenausdehnung

Die Klassifikation der Gefahrenausdehnung zielt darauf ab, die in der Bildinterpretation visuell detektierte Gefahrenausdehnung, am Südhang des Merapi, durch Computer gestützte semiautomatische Klassifikationsverfahren aus den SAR-Bildern zu extrahieren.

#### 3.3.1 Methoden

Die Gefahrenausdehnung am Südhang des Merapi wurde aus den Bildpaaren vom 26.10.2010 & 6.11.2010 sowie einer einzelnen Aufnahme vom 6.11.2010 extrahiert. Dazu wurde die Software eCoginition verwendet. Diese verwendet anstelle der in der Fernerkundung klassischerweise genutzten pixelbasierten Klassifikationsverfahren einen Objekt- basierten Ansatz zur Klassifikation. Dieser wird im Folgenden erläutert. Anschließend werden die zur Extraktion der Gefahrenausdehnung genutzten Parameter beschrieben.

## OBIA

Der *OBIA*- (**O**bject **B**ased **I**mage **A**alysis) Ansatz ermöglicht es neben der Helligkeit der Pixel auch Texturmerkmale, Nachbarschaftsbeziehungen oder Formeigenschaften für eine Klassifikation zu berücksichtigen (BAATZ et al. 2008: 31f), dies ist bei einer pixelbasierten Bildklassifikation nur sehr schwer oder gar nicht möglich (BENZ et al. 2004: 242). Dies ist möglich weil bei OBIA nicht einzelne Pixel sondern topologisch verknüpfte Pixelgruppen, sogenannte **Segmente**, betrachtet werden. Die Bildsegmentierung erfolgt aufgrund eines sogenannten Homogenitätskriteriums (ALBERTZ & WIGGENHAGEN 2009: 205). Ziel ist es, möglichst bedeutungsvolle, real-weltliche, Segmentegrenzen zu erhalten. Zur Segmentierung stehen die Algorithmen der: *Chessboard*, *Contrast Split*, *Quadtree*, *Spectral Difference*, *Contrast Filter*, *Multi Threshold* und *Multiresolution* zur Verfügung (eCognition Inc. 2009: 32 ff). In dieser Arbeit wird zur Segmentierung der Multiresolution Algorithmus verwendet. Dieser basiert auf einer paarweisen Regionen-Zusammenführung, bei der die Pixel oder erstellte Segmente sich jeweils das ähnlichste benachbarte Pixel (oder Segment) suchen und sich mit diesem vereinigen, um zu einem Segment zu werden. Dieser, auch *Bottom-Up* Ansatz genannte Algorithmus wird so oft wiederholt, bis das Homogenitätskriterium in einem Bereich überschritten wird. Das **Homogenitätskriterium** ist definiert als Kombination aus Form- und Farb- Homogenität (eCognition Inc. 2009: 37). Diese Kombination kann durch Setzen des *Scale* Parameters beeinflusst werden. So bewirkt ein hoher Scale- Parameter- Wert größere Segmente, während ein niedriger Wert kleinere Segmente bildet. Die Kombination von Farb- und Form- Homogenität wird in Abbildung 3.3.1 dargestellt. Es werden also die Homogenität der Farbe, der Kompaktheit und der Glattheit berücksichtigt. Während die Farbe oft der wichtigste Parameter zur Erstellung bedeutungsvoller Segmente darstellt, liefert bei stark texturierten Bildern, wie z.B. bei SAR- Bildern, der Form- Parameter gute Ergebnisse (eCognition Inc. 2009: 40).

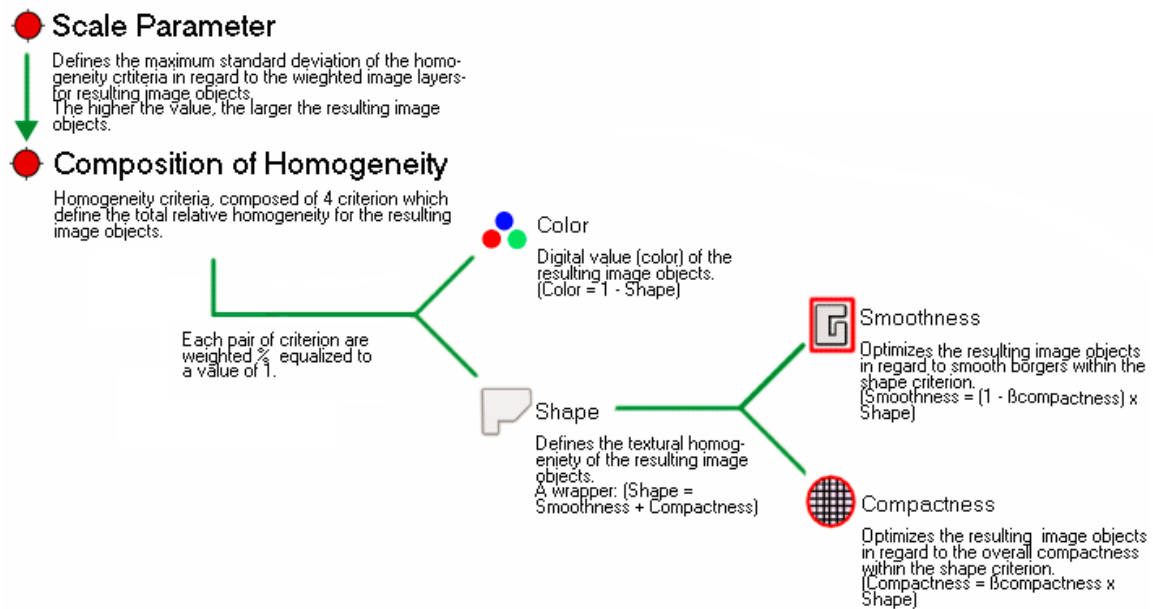


Abbildung 3.3.1: Zusammensetzung des Homogenitätskriterium

Quelle: verändert nach eCognition Reference Book 2009: 40

Zu Beginn der Klassifikation wurde das multitemporale StripMap RGB- Komposit vom Typ Differenz (26.10.2010 & 6.11.2010) in eCognition als Projekt geladen. Es wurde ein Bildausschnitt (*Subset*) definiert und NoData Werte ausgeschlossen. Daraufhin begann eine Initiale Segmentierung der Pixel. Es wurden verschiedene Scale Parameter für die multiresolution- Segmentierung getestet (siehe Abbildung 3.3.2). Ziel ist es, so große Segmente wie möglich und so kleine wie nötig zu bekommen (eCognition Reference Book 2009: 40). So zeigte sich ein Scale Parameter Wert von 350 als geeignete Größe um die Ausdehnung des Gefahrenbereichs als möglichst großes Objekt zu erhalten (siehe Abbildung 3.3.2).



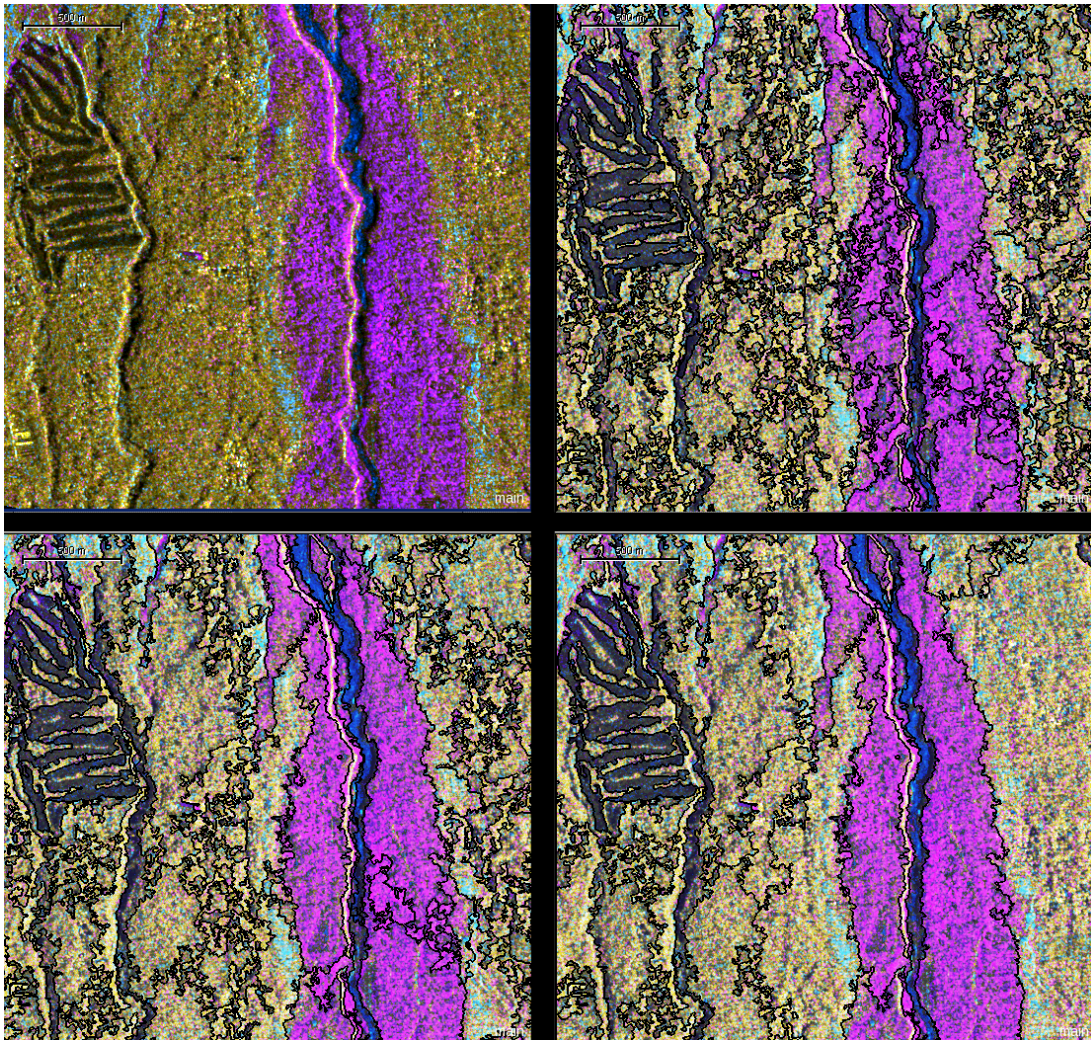


Abbildung 3.3.2: Multiresolution Segmentierung mit verschiedenen Scale Parametern und Segmentgrenzen (oben links: RGB Komposit ohne Segmentierung, oben rechts: Scale: 150, unten links: Scale: 250, unten rechts: Scale: 350) Quelle: eigene Darstellung

Nachdem das Bild in Segmente aufgeteilt war, wurde der NCI (siehe Kap. 3.1) innerhalb der Funktion *customized Algorithms* implementiert und ausgeführt. Durch manuelle Schwellwertbildung wurde ein Bereich kleiner  $-0,1$  und größer  $+0,1$  als Veränderungsbereich definiert (siehe Abbildung 3.3.3 B, C). Anschließend wurden alle Segmente, welche die erwähnte definierte Wertespanne des NCI erfüllten, als Objekt „Gefahrenbereich“ klassifiziert (siehe Abbildung 3.3.4). Weil sich innerhalb des Objekts Gefahrenbereich jedoch unklassifizierte Objekte mit einem NCI zwischen  $-0,1$  und  $+0,1$  befanden, war der Gefahrenbereich kein flächendeckend geschlossenes Polygon. Aufgrund von Layover- und Shadow- effekten war es besonders in der oberen Bildhälfte der Abbildung 3.3.4 (links) zu Objekten ohne Helligkeitsänderung gekommen. Da ein



pyroklastischer Block & Aschestrom bzw. Surge aber in der Regel flächendeckendes Phänomen ist, wurden die unklassifizierten Objekte zur Klasse Gefahrenausdehnung hinzugefügt. Dies geschah durch die Funktion *enclosed by class*. Dabei werden alle Objekte, die von der Klasse Gefahrenausdehnung vollständig umschlossen sind, der Klasse Gefahrenausdehnung hinzugefügt (siehe Abbildung 3.3.4, rechts).

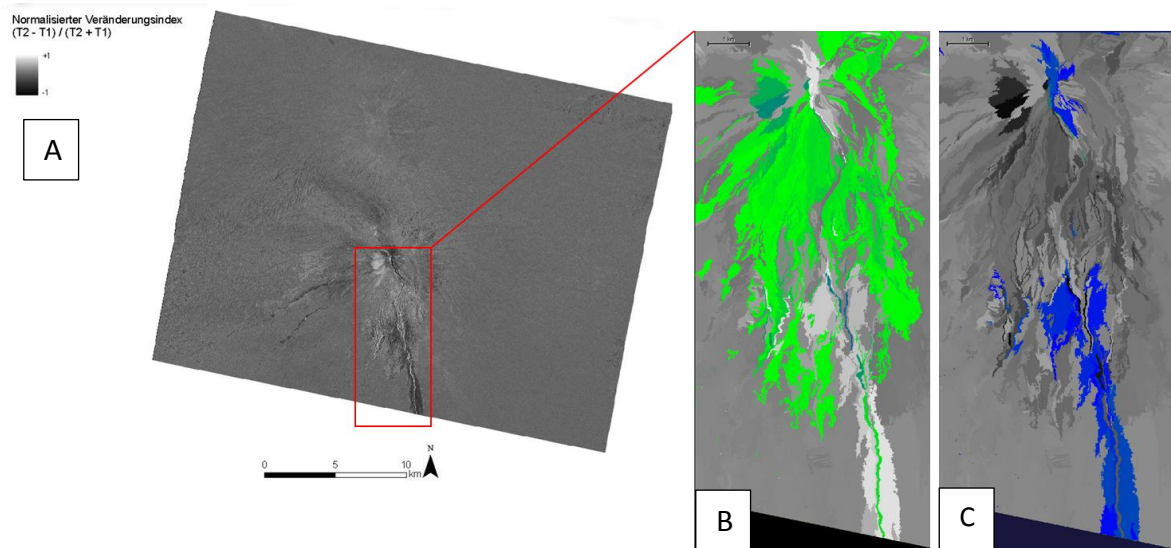


Abbildung 3.3.3: NCI- Berechnung (A) und Objekte mit einem NCI > 0,1 (B) bzw. NCI < - 0,1 (C) Quelle: eigene Darstellung

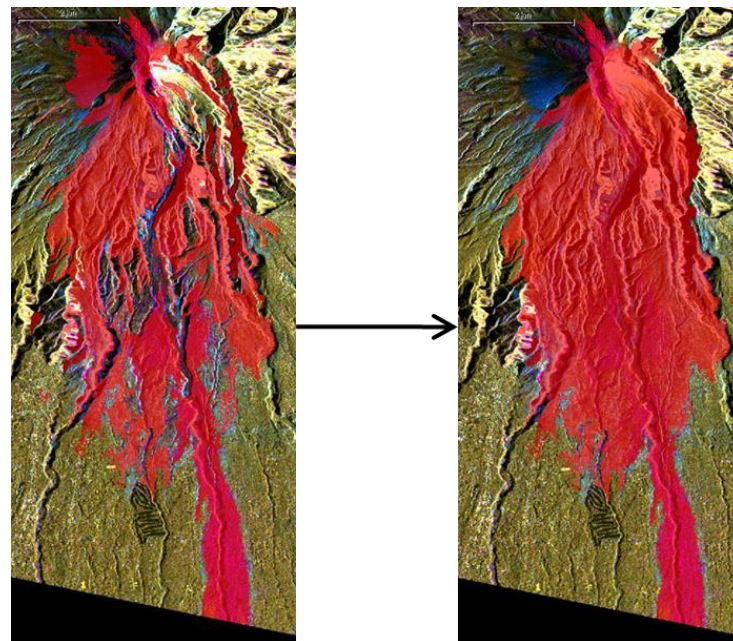


Abbildung 3.3.4: Objekte mit „sicherer“ Veränderung (links), Objekt nach dem Schließen der Lücken (rechts) Quelle: eigene Darstellung

Die nun als Gefahrenbereich klassifizierten Objekte wurden anschließend durch die Funktion *merge region* zu einem einzigen Objekt zusammengefasst und als Polygon im Shape Format exportiert. Weil der Überlappungsbereich der beiden StripMap Szenen aber nicht den gesamten Gefahrenbereich des pyroklastischen Stroms abbildete, fand eine weitere Klassifikation der Gefahrenausdehnung ausgehend von der Post- Disaster StripMap Szene vom 6.11.2010 statt. Eine Beschreibung dieser Klassifikation findet im folgenden Abschnitt statt.

Zur Klassifikation des südlichen Bereichs des pyroklastischen Stroms wurde die StripMap Szene vom 6.11.2010 in eCognition als Projekt importiert. Es wurde ein Subset definiert (rotes Rechteck in der Abbildung x), welches den unteren Bereich des pyroklastischen Stroms abdeckt. Daraufhin wurde dieses Subset mittels der multiresolution Segmentierung in Objekte aufgeteilt. Das Homogenitätskriterium berücksichtigte bei der Segmentierung zu 90% die Pixel Helligkeit und zu 10% Form. Bei der Formeigenschaft wurde zu 5% die Kompaktheit und zu 95% die Glattheit berücksichtigt. Nach der Erstellung der Klasse Gefahrenbereich wurden durch manuelle Schwellwertbildung des Helligkeitsparameters (*mean Brightness*  $\leq 130$ ) die dunklen Objekte dieser Klasse zugewiesen. Daraufhin wurden die einzelnen Objekte dieser Klasse zu einem Objekt zusammengefasst (*merge region*). Da es sich bei dem zu klassifizierenden pyroklastischen Strom um ein großes Objekt handelt, wurden alle Objekte die kleiner als 12 000 Pixel sind, der Klasse „unklassifiziert“ zugewiesen. Die Größe von 12 000 Pixeln resultierte aus dem kleinsten Objekt welches zum pyroklastischen Strom dazugehört. Um die Klasse Gefahrenbereich weiter einzugrenzen wurde ein Texturmerkmal genutzt. Dazu wurde eine Texturfunktion nach HARALICK verwendet (HARALICK et al. 1973). Diese nutzt eine sogenannte Grey Level Co-Occurrence Matrix (GLCM), diese zeigt die Verteilung von Grauwertkombinationen in einem Bild an (eCognition Inc. 2009: 216) und folgt der Gleichung:

$$P_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}}$$



mit:

$i$  : Bildzeile

$j$  : Bildspalte

$V_{i,j}$  : der Wert in der Zelle  $i,j$  der Matrix

$P_{i,j}$  : der normalisierte Wert in der Zelle  $i,j$

$N$  : die Anzahl der Bildzeilen oder Bildspalten

Für die zu klassifizierenden Objekte lagen die Werte der GLCM zwischen 0,4428 und 0,4434. Alle Objekte, deren Werte größer bzw. kleiner waren, wurden der Klasse „unklassifiziert“ zugewiesen. Da einzelne Objekte innerhalb der Klasse Gefahrenbereich noch unklassifiziert waren, wurde der Algorithmus *enclosed by class* genutzt um ein lückenloses Polygon zu erhalten. Damit wurden alle Objekte, die komplett von der Klasse Gefahrenbereich umschlossen sind, der Klasse Gefahrenbereich zugewiesen. Abschließend wurden alle Objekte der Klasse Gefahrenbereich zu einem Objekt zusammengefasst und als Polygon im Shapeformat exportiert.

Die beiden als Gefahrenbereiche klassifizierten Flächen (nördlicher Abschnitt & südlicher Abschnitt) wurden in ArcGIS durch die *merge* Funktion zu einem Polygon zusammengefasst (siehe Abbildung 3.3.5).

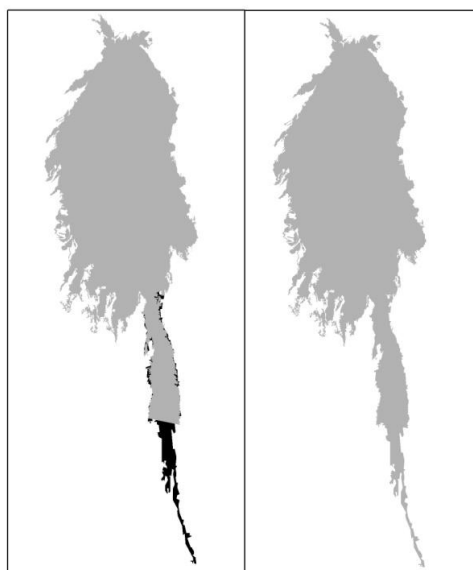


Abbildung 3.3.5: Zusammenfassen der Gefahrenbereiche (NCI- (grau) und der Textur- (schwarz) basierten Klassifikation) Quelle: eigene Darstellung

### *Klassifikation des SpotLight Bildpaares (4.11.2010 – 15.11.2010)*

Die Klassifikation des SpotLight Bildpaares vom 4.11.2010 und 15.11.2010 zielte neben der Gefahrenaussdehnung auch auf die Klassifikation von zerstörten Gebäuden ab. So wurden mittels eines Top-Down Ansatzes zuerst sehr große Objekte gebildet mit dem Ziel Layover- und Shadow- Bereiche auszuschließen, bzw. der Klasse „keine Daten“ zuzuweisen. Die übrigen Gebiete wurden anschließend in kleinere Objekte aufgeteilt. Bei der ersten Segmentierung wurde ein Scale Parameter von 500 gewählt um das Untersuchungsgebiet und den Block und Asche Strom innerhalb des Subsets der SpotLight Szene zu klassifizieren. So wurden alle Objekte mit einer Pixelgröße von mehr als 147 000 Pixeln als Untersuchungsgebiet klassifiziert. Weiterhin wurde das Objekt mit einer Pixelanzahl gleich 183 854 der Klasse Block und Asche Strom zugewiesen. Alle anderen Objekte wurden der Klasse „keine Daten“ zugewiesen. Nun wurde die *map* mit der Funktion *copy map* dupliziert und anschließend alle Objekte die als Untersuchungsgebiet klassifiziert waren mit einem Scale Parameter von 150 unter Verwendung des multiresolution Algorithmus segmentiert. Jetzt wurden die Klassen „Surge Ablagerungen“ und „unbetroffenes Gebiet“ erstellt. Daraufhin wurde der NCI für die zweite Segmentierungsstufe berechnet und ein manueller Schwellwert gebildet. So wurden in dieser Segmentierungsstufe alle Objekte größer +0,1 und kleiner -0,1 der Klasse „Surge Ablagerungen“ zugewiesen. Alle anderen Objekte wurden der Klasse „unbetroffenes Gebiet“ zugewiesen. Die zweite *map* wurde nun abermals durch den Befehl *copy map* dupliziert und alle Objekte, die als Untersuchungsgebiet klassifiziert waren, mit einem Scale Parameter von 50 und dem multiresolution Algorithmus segmentiert. Ziel dieser Segmentierung war die Klassifikation von Gebäuden. Daher wurden die Klassen „zerstörte Gebäude“ und „Gebäude“ erstellt. Durch manuelle Schwellwertbildung wurden alle Objekte mit einer Helligkeit (*mean Brightness*) größer als 350 und einer Objektgröße kleiner als 500 Pixel den Klassen „betroffene Gebäude“ bzw. „Gebäude“ zugewiesen. D.h. lagen die Objekte innerhalb der Klasse „Surge Ablagerungen“ wurden sie der Klasse „betroffene Gebäude“ zugewiesen, andernfalls der Klasse „Gebäude“. Abschließend wurden alle Objekte einer Klasse zusammengefasst (*merge region*) und als Polygon im Shape Format exportiert. Alle zur Klassifikation verwendeten Prozessbäume sind im Anhang abgebildet.

Während diese Methode sowohl die Gefahrenausdehnung als auch eine Schadensabschätzung hinsichtlich potentieller Gebäude umfasst, ist dies aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung der StripMap Szenen nur mit einem beträchtlichen Zeitaufwand machbar. Da Zeit im Krisenfall nicht zur Verfügung steht wurde eine pre Disaster Landbedeckungsklassifikation basierend auf optischen Daten durchgeführt. Diese wurde dann mit der StripMap- basierten Klassifikation der Gefahrenausdehnung verschnitten um den Schaden einzuschätzen (siehe Kapitel 3.4).

### 3.3.2 Ergebnisse

Die Klassifikation der Gefahrenausdehnung des pyroklastischen Stroms am Kali Gendol liefert die in Abb 3.3.6 dargestellte Fläche (rote Umrandung). Die extrahierte Gefahrenausdehnung hat eine Länge von rund 15 km und eine maximale Breite von 4 km. Insgesamt nimmt Sie eine Fläche von etwa 28 km<sup>2</sup> ein. Die Klassifikation basiert im nördlichen Teil (bis zur gepunkteten schwarzen Linie) auf dem NCI zwischen dem 26.10.2010 und dem 6.11.2010. Der südlich der gepunkteten Schwarzen Linie liegende Bildbereich wurde durch Helligkeits-, Textur- und Form- Parameter des SAR- Bilds vom 6.11.2010 klassifiziert. Der dunkle homogene Bereich im südlichen Bereich konnte relativ genau klassifiziert werden. So folgt die klassifizierte Gefahrenausdehnung des pyroklastischen Stroms im südlichsten Abschnitt sehr genau dem Flussbett. Im nördlichen Abschnitt, etwa ab dem Golfplatz, ist die Grenze weniger exakt klassifiziert. Dies liegt an einem fließenden Übergang zwischen den vom Surge betroffenen und nicht vom Surge betroffenen Gebieten auf den SAR- Bildern.

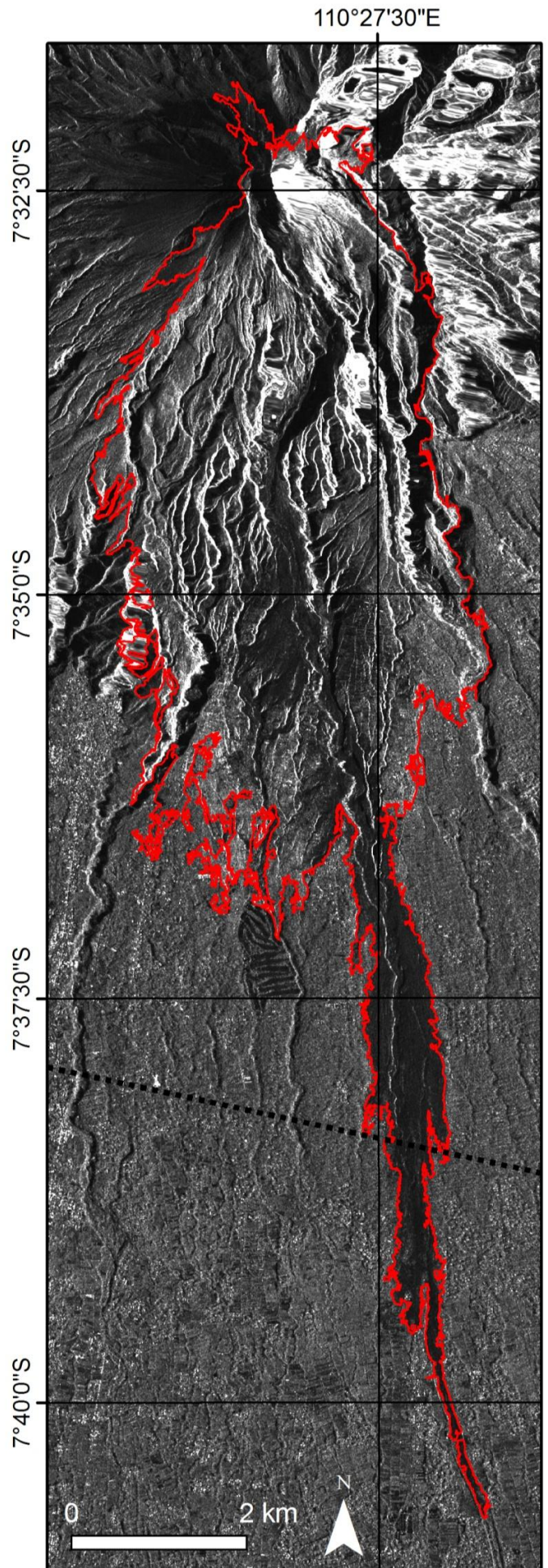


Abbildung 3.3.6: Klassifikationsergebnis des Gefahrenbereichs auf der Aufnahme vom 6.11.2010 Quelle: eigene Darstellung



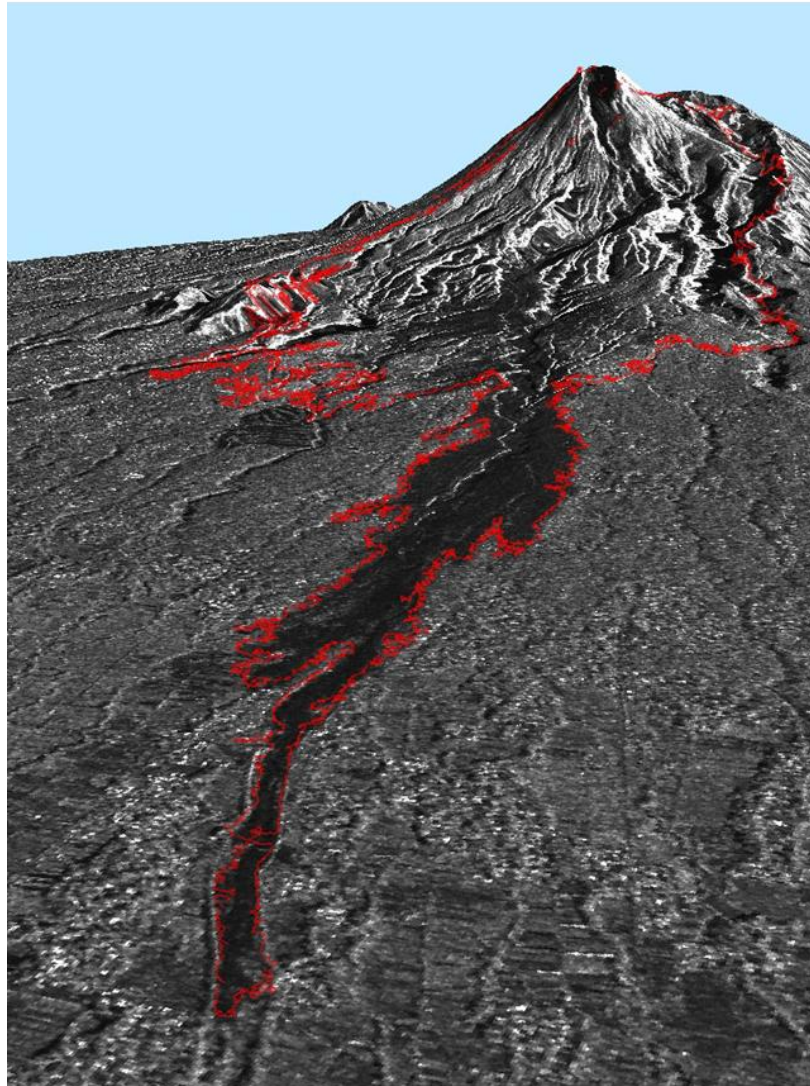


FOTO UDARA OBLIQUE (MIRING) SEBAGIAN WILAYAH G. API MERAPI, 15 NOVEMBER 2010  
Kali Gendol, Kec. Cangkringan, Kab. Sleman, Yogyakarta



Abbildung 3.3.7:  
Vergleich TS-X  
Schrägsicht auf  
einem SRTM- DEM  
mit zweifacher  
Überhöhung und  
extrahiertem  
Gefahrenbereich  
(links) 6.11.2010  
und optisches  
Schrägluftbild  
(rechts) 15.11.2010  
Quelle: links:  
eigene Darstellung,  
rechts: BDNP

Bei einem Vergleich zwischen SAR- basiertem Gefahrenbereich und einem optischen Schrägluftbild wird die Ähnlichkeit des Gefahrenbereichs deutlich (Abbildung 3.3.7). Obwohl die Ansichten perspektivisch verschieden sind, ist der Verlauf des pyroklastischen Stroms auf beiden Abbildungen wieder zu erkennen. Um die Genauigkeit der klassifizierten Gefahrenausdehnung abzuschätzen, wird diese mit einer manuell digitalisierten Gefahrenausdehnung auf Basis einer WorldView Szene vom 11.11.2010 verglichen. Das Testgebiet (siehe Abbildung 3.3.8 – weißes Rechteck) befindet sich am Kali Gendol zwischen 600 und 900 m ü. NN und ist circa 9 km<sup>2</sup> groß. Es finden sich an dieser Stelle, wie in Kapitel 3.2 erörtert, sowohl Block & Ascheablagerungen als auch Surge Ablagerungen. In Abbildung 3.3.8 ist links oben das verwendete TSX-Differenzbild vom 26.10.2010 & 6.11.2010 sowie links unten die genutzte WorldView Szene vom 11.11.2010 mit digitalisierter Linie (rote Linie) zu sehen. Im rechten Abschnitt sind die Validierungsergebnisse farblich (grün, gelb, rot) dargestellt.

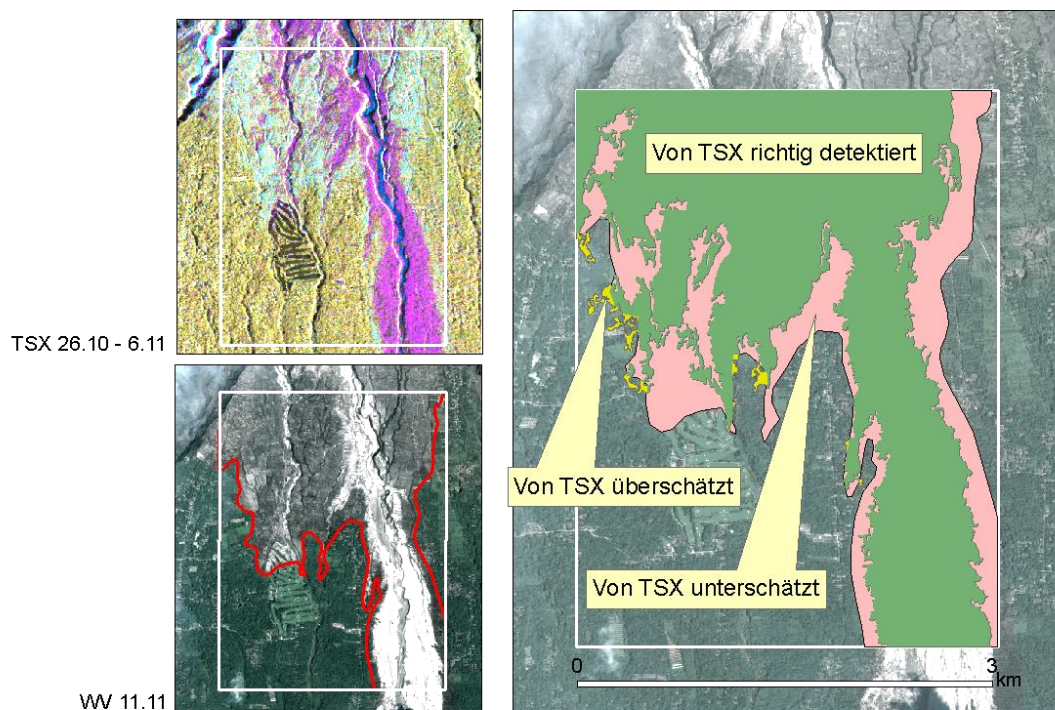


Abbildung 3.3.8: Genauigkeitsabschätzung TerraSAR-X vs. WorldView-2  
Quelle: DigitalGlobe

Die Auswertungsergebnisse der Flächengrößen in % bezogen auf die manuell digitalisierte Referenzfläche zeigt Tabelle 3.3.1.

Tabelle 3.3.1: Genauigkeitsabschätzung TSX vs. WV Quelle: eigene Darstellung

Fläche von TSX		
	richtig	
überschätzt	unterschätzt	detektiert
1%	26,70%	72,30%

Die Klassifikation der SpotLight Szenen vom 4.11.2010 und 15.11.2010 liefert das in Abbildung 3.3.9 abgebildete Ergebnis. Der klassifizierte Bereich befindet sich am Südhang des Merapi, am Oberlauf des Kali Gendol. Die Lage dieses Bereichs auf dem RGB-Komposit des verwendeten SpotLight Bildpaares ist in Abbildung 3.3.9 (unten) als rotes Rechteck zu sehen. Die Klassifikation umfasst die sechs folgenden Klassen: Block & Ascheablagerungen, Surge Ablagerungen, unbetroffenes Gebiet, betroffene Gebäude, Gebäude und keine Daten. Die Farbkodierung dieser Klassen ist der Legende zu entnehmen. Das Klassifikationsergebnis zeigt zahlreiche Gebäude als rote bzw. grüne Punkte. Weiterhin ist die in Kapitel 3.2. erkannte Verzweigung zwischen Kali Gendol und Kali Opak auch in der Klassifikation deutlich sichtbar. Ein Vergleich mit einer WorldView Szene vom 11.11.2010 zeigt, dass einzelne Gebäude z.T. gut detektiert wurden (grüne Markierung in Abbildung 3.3.10). Allerdings wurde der Surge in den rot markierten Bereichen bei der Klassifikation unterschätzt.



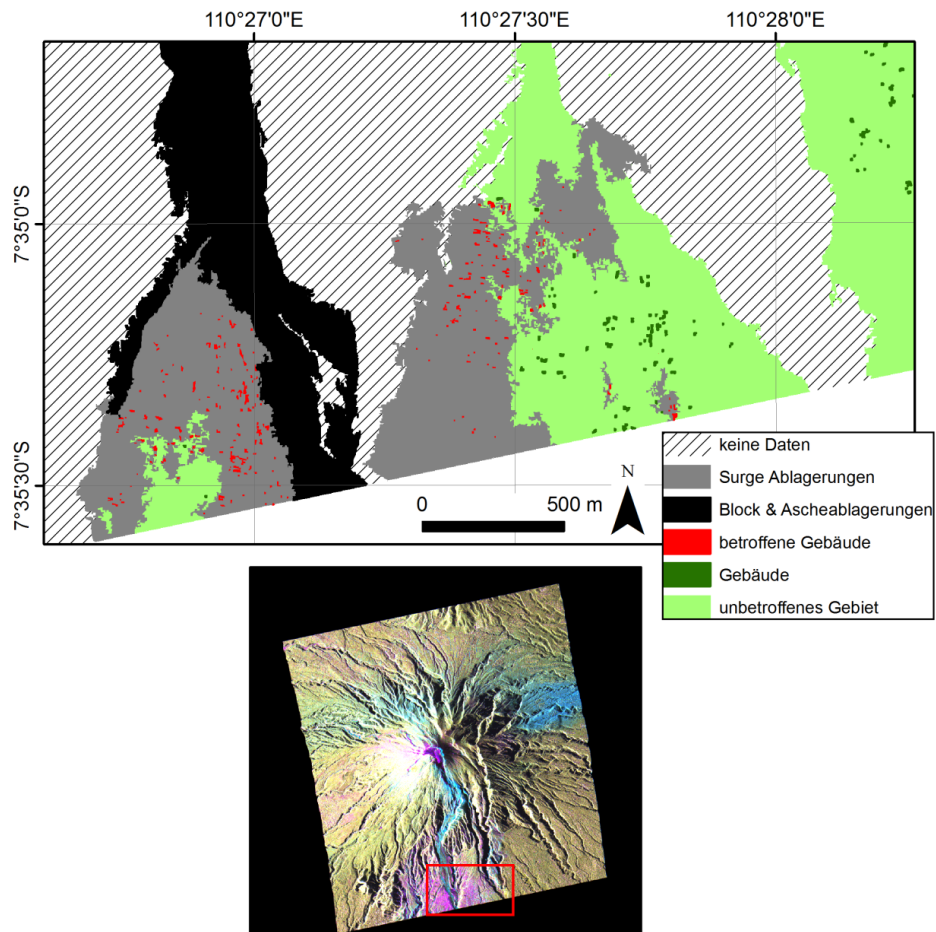


Abbildung 3.3.9: Ergebnis der SpotLight Klassifikation (oben) und die Lage der Klassifikation auf der SpotLight Szene (rotes Rechteck, unten) Quelle: eigene Darstellung

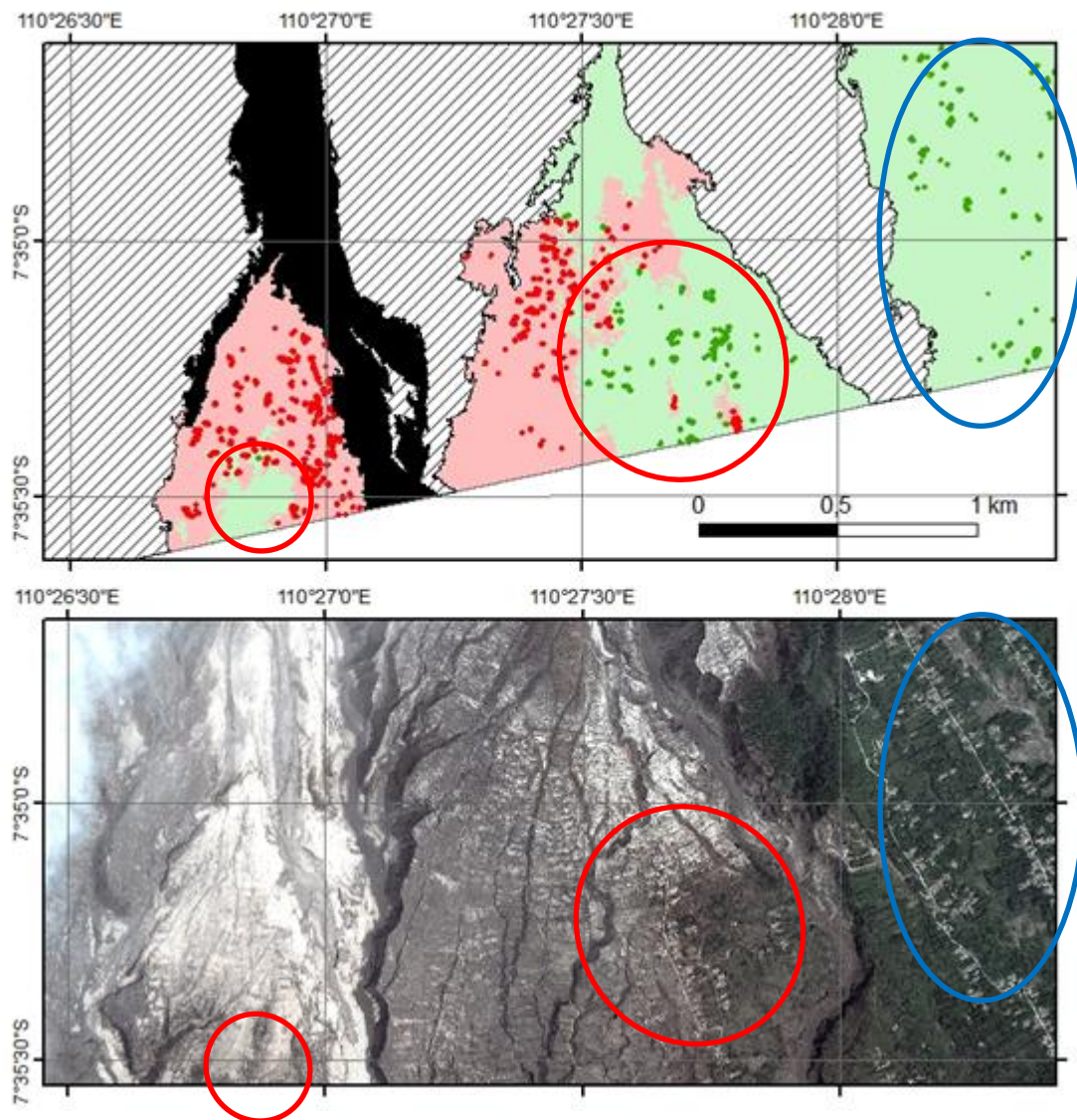


Abbildung 3.3.10: Validierung SpotLight Klassifikation vs. WorldView Quelle: Digital Globe

Auch wenn eine exakte Grenzziehung des vom Surge betroffenen Gebietes mittels semiautomatischer Klassifikation schwer fällt, so liefert diese Methode doch brauchbare Ergebnisse, besonders in Bezug auf den Block & Aschestrom und die Gebäudedetektion. Zudem ist der Zeitaufwand, besonders bei großen Gefahrenbereichen, im Vergleich zur manuellen Digitalisierung, relativ gering, was besonders im zeitkritischen Kontext der Kriseninformation von Bedeutung ist (vgl. Kapitel 1.1).

### 3.4 Schadensabschätzung

Die Schadensabschätzung zielt darauf ab Hilfskräfte bei der Bewältigung der Folgen eines Vulkanausbruchs zu unterstützen. Darüber hinaus bezwecken die Informationen über Art und Lage des Schadens die Koordination des Wiederaufbaus zu unterstützen.

Grundlegend für die Schadensabschätzung ist es, zu wissen, welche Art der Flächen sich in dem Gefahrenbereich befindet. Zwei Ansätze werden hier vorgestellt: Zum einen die Abschätzung mittels Informationen der Landnutzung und zum anderen mittels Informationen der Landbedeckung. Während die Landnutzungsinformationen bereits eine Klassifikation darstellen, müssen die Landbedeckungsinformationen erst durch Klassifikation von Fernerkundungsdaten extrahiert werden. Die hier vorliegende Landnutzungsinformation stammt von BAPPEDA (Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Amt für Raumplanung) und umfasst den Regierungsbezirk Sleman, von den Bezirken Magelang, Boyolali und Klaten liegen keine Daten vor. Die zur Klassifikation der Landbedeckung verwendete Satellitenszene stammt vom optischen Fernerkundungssatelliten Kompsat-2.

#### 3.4.1 Methoden

Um Informationen über die Art und Größe der betroffenen Flächen zu erhalten, war eine GIS-Verschneidung der Gefahrenausdehnung mit einer Pre-Desaster Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation sowie anschließend eine Flächenberechnung der einzelnen Klassen

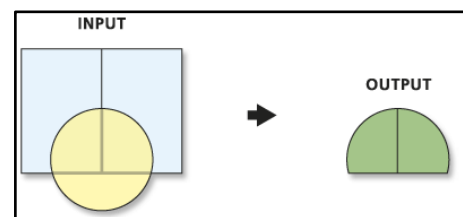


Abbildung 3.4.1: Funktionsweise der Intersect Operation Quelle: ArcGIS Inc.

notwendig. Diese GIS- Verschneidung wurde durch eine *intersect* Operation zwischen dem in Kapitel 3.3 auf Basis der StripMap Szenen (26.10.2010 & 6.11.2010) extrahierten Gefahrenbereich einerseits und einer Kompsat basierten Landbedeckungskarte bzw. einer Landnutzungskarte andererseits abgeleitet. Die Verschneidungsoperation *intersect* wurde mit der Software ArcGIS durchgeführt. Der Output der ArcGIS Operation *intersect* ist der gemeinsame Überlappungsbereich der Input- Daten (Shapefiles). Dabei bleiben die einzelnen in den Inputdaten vorhandenen Polygone im Output erhalten.

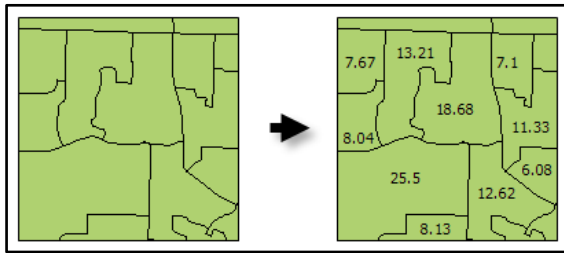


Abbildung 3.4.2: Funktionsweise der calculate area Operation  
Quelle: ArcGIS Inc.

Nachdem die im Gefahrenbereich liegenden Flächen extrahiert waren, wurde die Fläche der einzelnen Landbedeckungs-/ Landnutzungs- Klassen berechnet. Zur Flächenberechnung wurde zuerst in ArcGIS die Funktion *calculate area* genutzt. Diese berechnet die Fläche für jedes Polygon. Um

die Gesamtfläche einer Landnutzungs-/ Landbedeckungsklasse zu erhalten, wurden alle Polygone einer Klasse selektiert und daraus ein neuer Layer geschaffen. Die Gesamtfläche aller Polygone des Layers wurde über die Summenfunktion innerhalb der Statistik der Attributtabelle abgerufen.

### **Schadensabschätzung mittels Landbedeckungsklassifikation der Kompsat Szene vom 23.6.2010**

Die hier beschriebene Landbedeckungsklassifikation lässt sich der Schaden abschätzen, auch wenn keine Landnutzungskarten vorliegen. Der erste Schritt bei der Schadensabschätzung ist die Landbedeckungsklassifikation der Satellitenszene. Hierfür wurden zwei Satellitenszenen mosaikiert, georeferenziert und radiometrisch korrigiert. Anschließend wurde das Satellitenbildmosaik in eCognition segmentiert und klassifiziert. Die Segmentierung nutzte den Multiresolution- Algorithmus mit einem Scale- Parameter von 80.

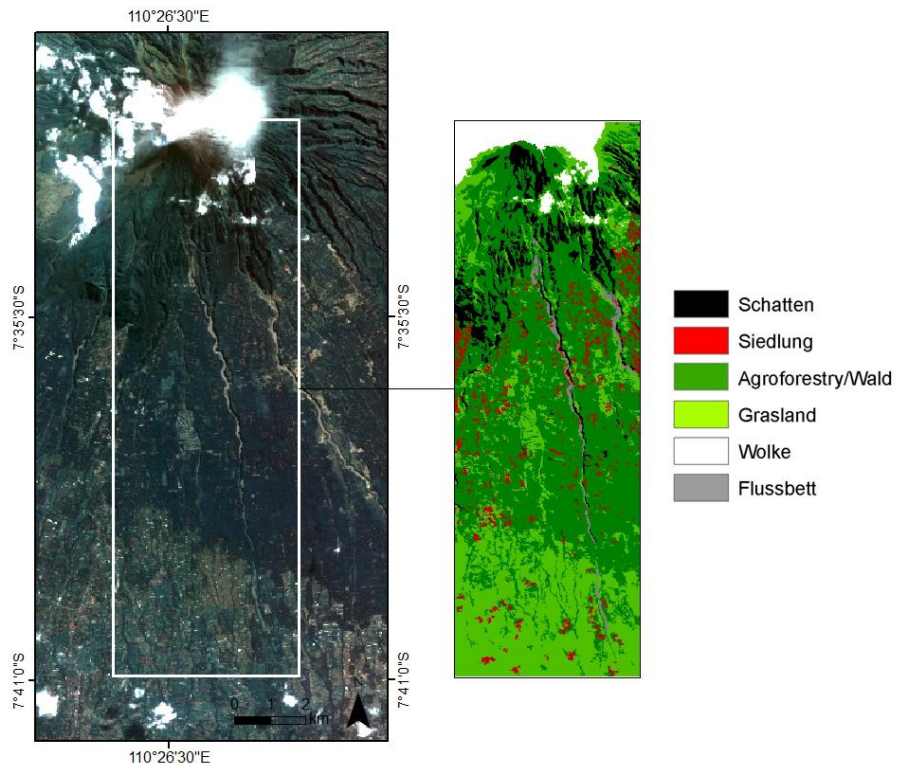


Abbildung 3.4.3: Komsat- basierte Landbedeckungsklassifikation  
Quelle: eigene Darstellung

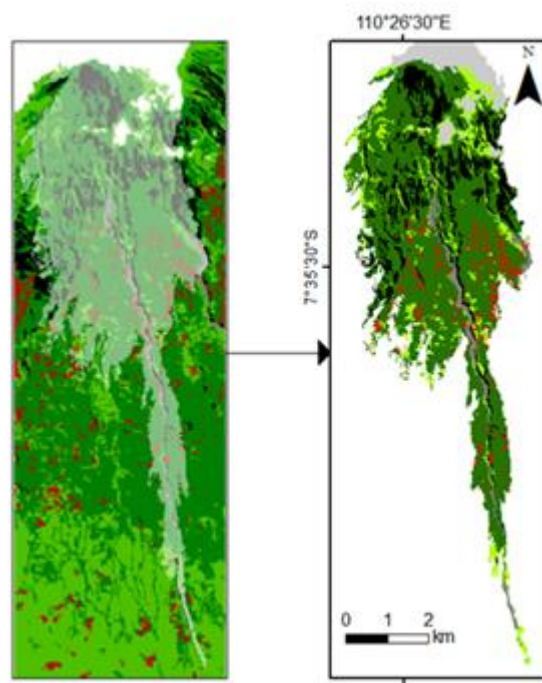


Abbildung 3.4.4: Landbedeckungskarte und Intersect Operation  
Quelle: eigene Darstellung



Zur Klassifikation wurden die folgenden Klassen verwendet: Siedlung, Agroforestry/ Wald, Grasland, Wolke, Schatten und Flussbett. Der zur Klassifikation verwendete Prozessbaum (siehe Anhang) nutzte Helligkeits-, Helligkeitsdifferenz- (zwischen den Spektralen Kanälen 2 & 3) und Lage- Parameter, zusätzlich wurden bestimmte Segmente manuell klassifiziert. Die resultierende Klassifikation zeigt Abbildung 3.4.3.

Anhand dieser Klassifikation kann nun die oben beschriebene intersect Operation ausgeführt werden. Abbildung 3.4.4 zeigt die Anwendung der intersect Operation.

### ***Schadensabschätzung mittels BAPPEDA- Landnutzungsdaten***

Die Landnutzungsdaten umfassen die Klassen *Belukar* (dichter Wald), *Hutan* (Wald), *Kebun* (Agroforestry), *Pemukinan* (Siedlung), *Rumput* (Grasland), *Sawah Irigasi* (Bewässerungslandwirtschaft; Nassreis), *Sungai* (Fluss) und *Tanah Ladang* (Landwirtschaft). Abbildung 3.4.5 A zeigt die Landnutzungsklassen im Bezirk Sleman sowie die angrenzenden Bezirke des Deirah Istimewa Yogyakarta in hellgrau sowie das angrenzende Mitteljava in dunkelgrau. Zu erkennen ist, dass die Nutzungen Nassreis (Orange) und Siedlung (Rot) im Bezirk Sleman vorherrschen. Im unteren Teil der Abbildung 3.4.5 ist die Gefahrenausdehnung auf der Landnutzung (B) und das Resultat der intersect Operation abgebildet (C).



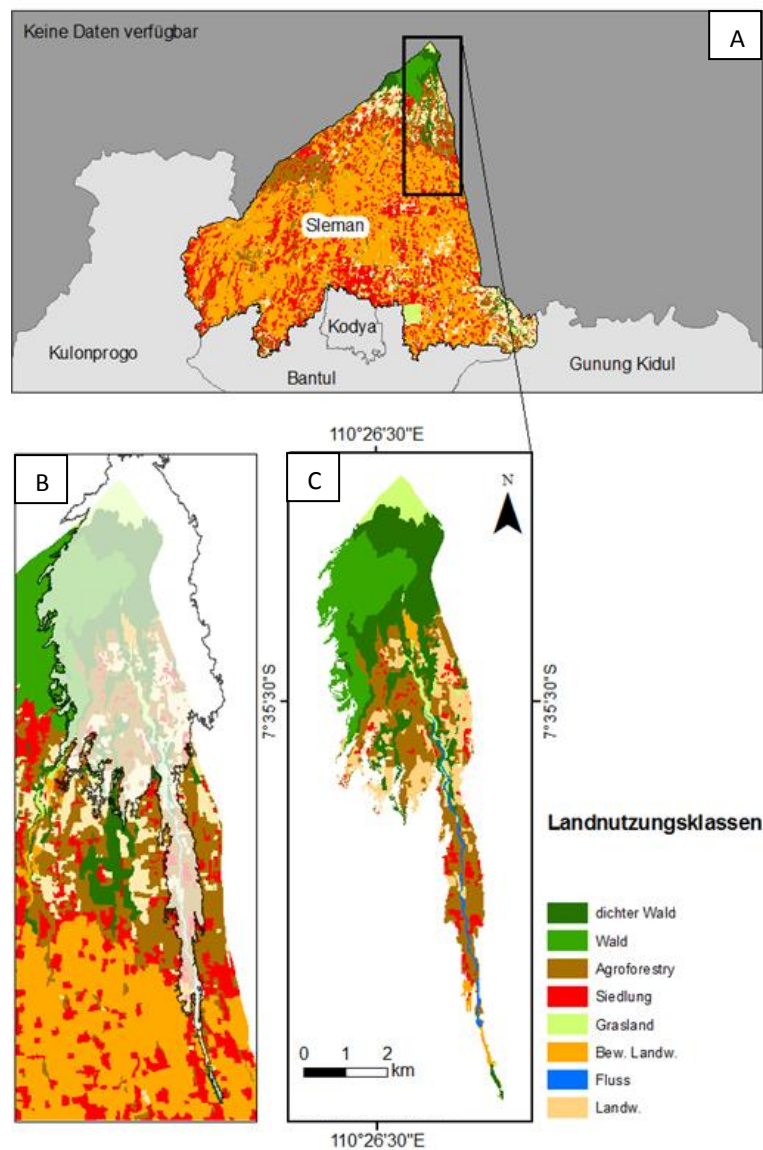


Abbildung 3.4.5: BAPPEDA Landnutzungsdaten und Intersect Operation

Quelle: BAPPEDA, eigene Darstellung

### 3.4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schadenabschätzung sind in Abbildung 3.4.6 dargestellt, wobei A das Ergebnis der Schadenabschätzung mittels Landbedeckungsklassifikation und B mittels Landnutzungsdaten ist.

Abbildung 3.4.6 A zeigt, dass überwiegend die Klasse Agroforestry/Wald im Gefahrenbereich liegt, 62 % (17,3 km<sup>2</sup> von 27,9 km<sup>2</sup>). Eine Unterscheidung zwischen Agroforestry und Wald war auf Basis der Kompsat-2 Szenen nicht möglich, obwohl ein deutlicher Unterschied bzgl. des Schadens für die Bevölkerung zwischen den beiden

Klassen besteht. Die Klassen Wolke und Schatten sind besonders im nördlichen Bereich vertreten und machen zusammen eine Fläche von 6,1 km<sup>2</sup> aus, dies bedeutet, dass etwa 22% der betroffenen Fläche keine Informationen über die Landbedeckung beinhalten. Die Klasse „Flussbett“ ist 0,8 km<sup>2</sup> groß und macht somit etwa 3%, die Klasse „Grasland“ 2,7 km<sup>2</sup> groß und knapp 10% aus. Als Siedlung wurde 1 km<sup>2</sup> und damit etwa 4% der Fläche erkannt. Die meisten Objekte der Klasse Siedlung befinden sich südlich von 7°35'00“.

In Abbildung 3.4.6 B sind die im Gefahrenbereich liegenden Landnutzungsklassen zu sehen. Die größte Fläche wird mit 21,1 % (5,9 km<sup>2</sup> von 27,9 km<sup>2</sup>) von der Klasse dichter Wald eingenommen. Diese Flächen befinden sich hauptsächlich nördlich von 7°35'0“, bzw. höher als circa 1100 m ü. NN (vgl. Abbildung 3.2.2). Die zweitgrößte Fläche im Gefahrenbereich wird von der Klasse Agroforestry mit 20 % (5,6 km<sup>2</sup>) eingenommen. Da die Bevölkerung in diesen Flächen verschiedene mehrjährige Nutzpflanzen im Stockwerkbau anpflanzt, ist eine Zerstörung dieser Flächen von z.T. großer ökonomischer Bedeutung. Als Siedlung wurde 1 km<sup>2</sup> und damit etwa 4 % der Fläche klassifiziert. Die meisten Objekte der Klasse Siedlung befinden sich südlich von 7°35'00'. Etwa 20,5 % (5,7 km<sup>2</sup>) des Gefahrenbereichs konnte wegen Datenmangels keiner Landnutzung zugewiesen werden.

Als Ergebnis der Schadensabschätzung kann zusammengefasst werden, dass in Abbildung 3.4.6 B Nutzland (Siedlung, Agroforestry, Bewässerungslandwirtschaft, Landwirtschaft) mit einer Ausdehnung von mindestens 10 km<sup>2</sup> (36% des Gefahrenbereichs) vom pyroklastischen Strom betroffen oder zerstört wurde. Abbildung 3.4.6 A lässt eine weniger klare Abschätzung des Schadens zu. Hier liefert die Schadensabschätzung lediglich eine Fläche von 1 km<sup>2</sup> Nutzland (Siedlung). Somit hängt die Qualität der Schadensabschätzung unmittelbar mit der Art der verfügbaren Datenbasis zusammen.

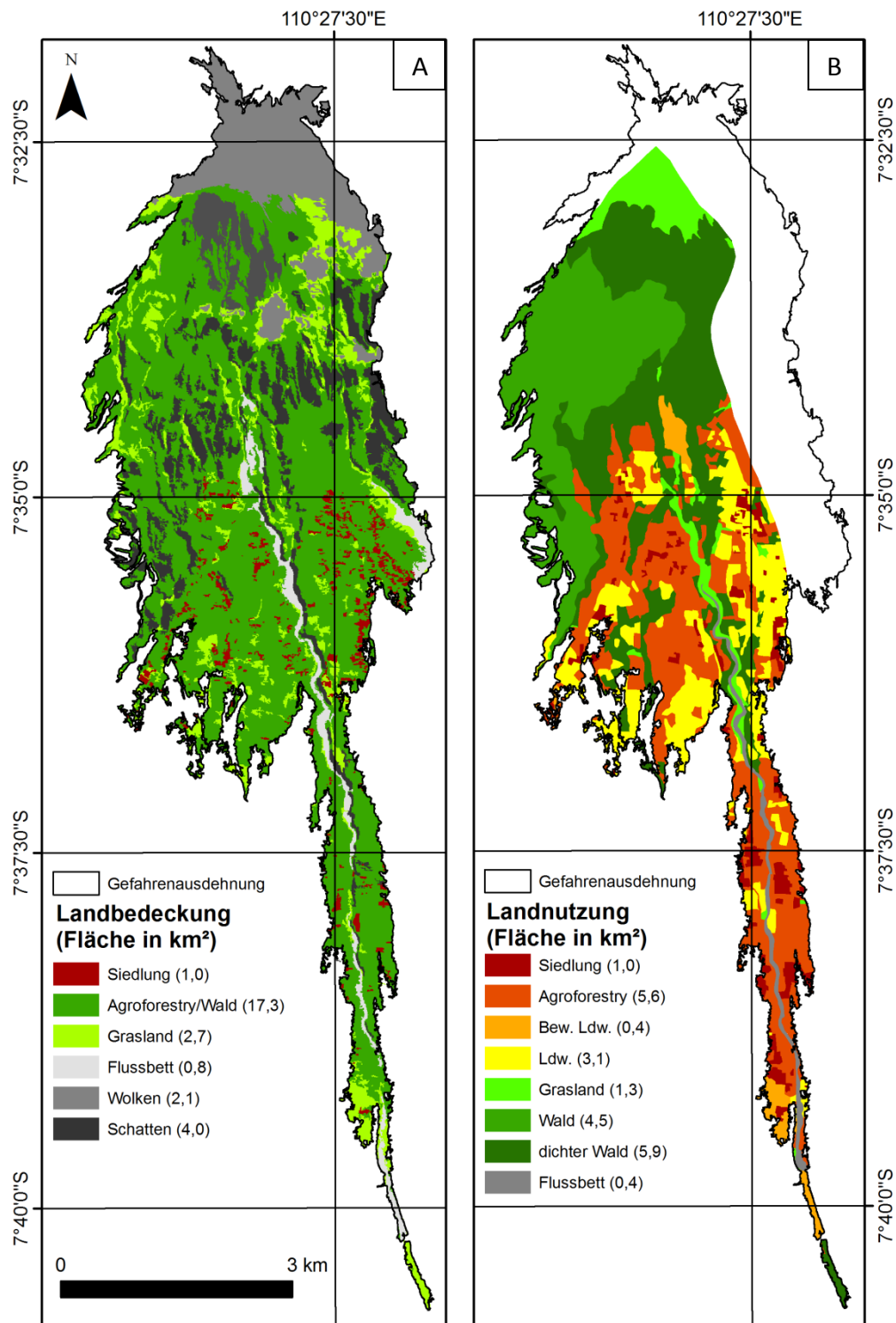


Abbildung 3.4.6: Ergebnis der Schadensabschätzung mit Landbedeckungsklassifikation  
(links) Quelle: Digital Globe & mit Landnutzungsdaten (rechts) Quelle: BAPPEDA

### 3.5 Radarschatten Analyse

In dieser Arbeit soll die Mächtigkeit der zwischen dem 26.10.2010 und dem 6.11.2010 abgelagerten Sedimente am Oberlauf des Kali Gendol gemessen werden. Solche Informationen können genutzt werden um Risikoeinschätzungen zu aktualisieren. Die Messung basiert auf einem Vergleich der Radarschatten, zwischen Pre- und Post-Desaster Szene.

#### 3.5.1 Methoden

Die Methode der Radarschatten Analyse nutzt die Eigenschaft aus, dass Oberflächen die steiler als der Einfallswinkel der Mikrowellen in Range Richtung sind, kein Signal empfangen bzw. rückstrahlen und daher theoretisch im SAR- Bild keine Amplitude aufgenommen wird. Solche Radar „Schatten“ können genutzt werden um die Topographie zu messen (LAPRADE & LEONARDO 1969, LEWIS & WAITE 1973). In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das betrachtete Tal durch vulkanogenes Material aufgefüllt und somit flacher wurde. Die folglich geringere Schattenlänge soll Auskunft über die Mächtigkeit des zwischenzeitlich abgelagerten Materials geben.

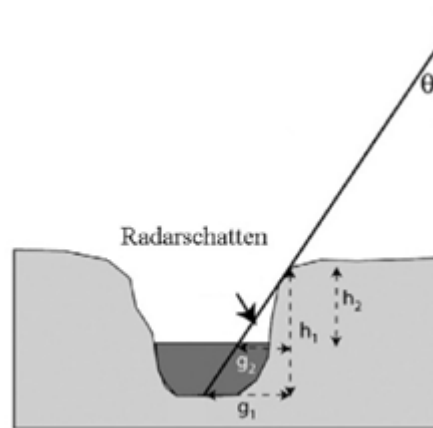


Abbildung 3.5.1: Radarschattenmessung zur Bestimmung der Auffüllhöhe

Quelle: WADGE et al. 2011: 144

Abbildung 3.5.1 zeigt ein Tal mit flachem Boden. Der Talboden ist so breit, dass es im SAR- Bild sichtbar ist. Zum Zeitpunkt 1 kann die Projektion des Radarschattens am Boden ( $g_1$ ) auf dem SAR- Bild, rechtwinklig zum Flusstal zu gemessen werden. Die Strecke  $g_1$  ist dabei

Abhängig von der Tal- Höhe ( $h_1$ ) und dem Einfallswinkel der Mikrowellenstrahlung,  $\theta$ . Dieser Zusammenhang wird durch folgende Funktion beschrieben:

$$h = g * \cot(\theta)$$

mit:

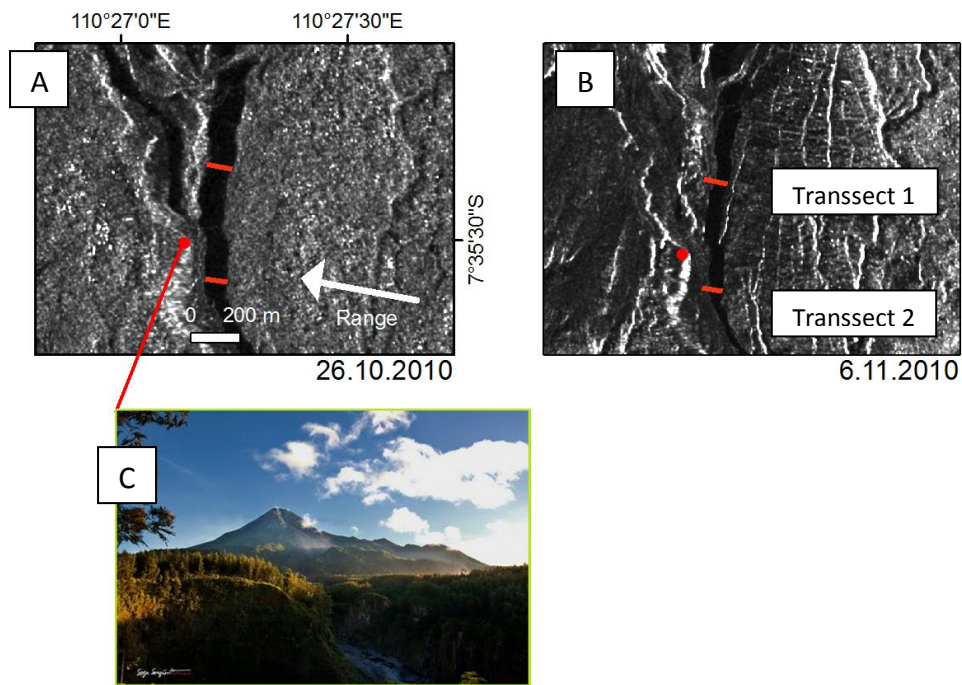
$h$  = Tal- Höhe

$g$  = Schattenlänge

$\theta$  = Einfallswinkel

Ist sowohl die Tal- Höhe im Pre- Desaster Bild als auch die Tal- Höhe im Post- Desaster Bild berechnet worden, kann daraus durch Subtraktion die zwischenzeitlich abgelagerte Sedimentmächtigkeit berechnet werden. Voraussetzung für exakte Ergebnisse ist jedoch ein Talverlauf, der parallel zum Azimuth der Flugrichtung verläuft. Abweichungen von  $<30^\circ$  von der Azimuth-Richtung gelten in der Praxis als Obergrenze für eine aussagefähige Messung (WADGE et al. 2011: 145). In dieser Arbeit beträgt die Abweichung  $<5^\circ$ . Zu sehen sind die Messstellen, Transsect 1 & 2, als rote Linie in Abbildung 3.5.2, der weiße Pfeil zeigt die Range Richtung der Aufnahme. Der rote Punkt in Abbildung 3.5.2 zeigt die Lage einer Fotografie an, die in C zu sehen ist (Blickrichtung etwa nach Norden). Der Einfallswinkel wurde aus den Metadaten der SAR- Aufnahmen extrahiert und beträgt für Transsect 1,  $\theta = 37,304^\circ$  und für Transsect 2,  $\theta = 37,298^\circ$ . Transsect 1 & 2 sind etwa 500 Meter voneinander entfernt, wobei Transsect 1 topographisch höher liegt





November 2009 - Quelle: Soga Soegiarto

Abbildung 3.5.2: Position der gemessenen Radarschatten

Quelle: eigene Darstellung; Quelle der Fotografie: Soga Soegiarto

### 3.5.2 Ergebnisse

Die Radarschatten Analyse lieferte im Transsect 1 eine Sedimentmächtigkeit von 73 m und im Transsect 2 eine Mächtigkeit von 51 m. Eine Auflistung der Messwerte zeigt Tabelle 3.5.1. Zu sehen ist, dass Transsect 1 eine größere Pre- Desaster Tal- Höhe als Transsect 2 hat und die abgelagerten Sedimente im Transsect 1, > 20 m mächtiger sind als in Transsect 2.

Tabelle 3.5.1: Ergebnis der Radarschatten- Analyse

	Transsect 1 (m)	Transsect 2 (m)
Pre- Desaster Talhöhe (h1)	137	114
Post- Desaster Talhöhe (h2)	64	63
Differenz h1-h2	73	51

Wie erwähnt, geht die Überlegung von einem flachen Talboden aus, bei dem die Mikrowellenstrahlung den Talboden erreicht. Wenn die Messstelle eine abweichende Talgeometrie aufweist, werden die Messwerte verzerrt oder unbrauchbar (siehe Abbildung 3.5.3). In Abbildung 3.5.3 sind Talquerschnitte, in grau, und

Sedimentmächtigkeiten in dunkelgrau dargestellt. Die rote Linie gibt die gemessene Talhöhe vor der Sedimentablagerung an. So wäre in Abbildung 3.5.3 A die gemessene Talhöhe zu gering, weil das Tal zu schmal für die Messmethode ist und auch in Abbildung 3.5.3 B wäre die gemessene Talhöhe nicht Aussagekräftig weil der eigentliche Pre-Desaster Talboden tiefer liegt als der Messwert angibt.

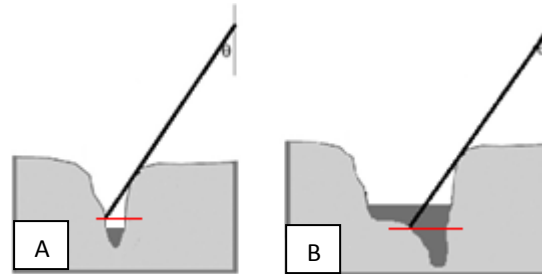


Abbildung 3.5.3: Einschränkungen der oben beschriebenen Methode, zu schmales Tal (A), unebener Talboden (B) Quelle: eigene Darstellung

### 3.6 Interferometrie

Um topographische Veränderungen flächendeckend zu messen können zwei digitale Höhenmodelle voneinander subtrahiert werden. Um zwei DEMs erstellen zu können sind mindestens drei SAR Aufnahmen mit gleichen Aufnahmeparametern im SLC Format und einer ausreichend hohen Kohärenz notwendig. Da für diese Arbeit lediglich zwei Aufnahmen vorliegen konnte keine Höhendifferenz errechnet werden. Trotzdem soll gezeigt werden wie aus zwei SAR- Aufnahmen mittels SAR Interferometrie ein DEM erstellt werden kann.

#### 3.6.1 Methoden

SAR-Interferometrie (InSAR) basiert auf der Auswertung mehrerer Single Look Komplex-Bilder, die aus unterschiedlichen Positionen und zum Teil zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen worden sind. Werden sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen, spricht man von repeat pass interferometry bei gleichem Zeitpunkt von single pass interferometry (HENDERSON & LEWIS 1998). Da die SAR-Antenne neben der Amplitude auch die Phasenlage, d.h. die Position der E-M Welle innerhalb eines Wellenzyklus beim Empfang misst kann eine Phasendifferenz,  $\delta p$ , sehr genau erfasst werden (Genauigkeit  $\leq$  Wellenlänge) (HENDERSON & LEWIS 1998: 360). Wird ein Objekt von

zwei Aufnahmepositionen  $A_1$  und  $A_2$  bestrahlt so ergibt sich durch unterschiedliche Entfernung zwischen SAR-Antenne und Erdoberfläche die Phasendifferenz  $\delta\rho$  (siehe Abbildung 3.6.1). Ist die Baseline  $B$  (Orientierung und Länge) und die Phasendifferenz  $\delta\rho$  bekannt so kann die Höhe  $Z$  berechnet werden (HENDERSON & LEWIS 1998: 360).

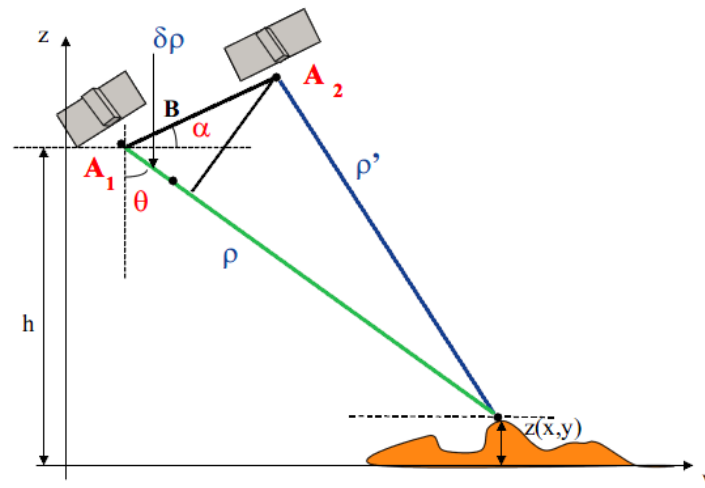


Abbildung 3.6.1: InSAR Geometrie Quelle: KERLE et al. 2004

Voraussetzung für eine exakte Messung ist u.a. dass  $B$  konstant bleibt (was bei flugzeuggetragenen Systemen und repeat pass Interferometrie Probleme macht) und ausreichend genau bekannt ist. Weiterhin ist eine Höhenmessung nur bei Bildpaaren mit ausreichend hoher Kohärenz möglich (Probleme bei repeat pass Interferometrie). Ist die Kohärenz ausreichend hoch kann ein so genanntes Interferogramm erstellt werden. Dieses besteht aus sogenannten fringes (und in Gebieten mit geringer Kohärenz durch zufallverteiltes Rauschen). Fringes sind streifenartige Flächen welche die Position der Phasendifferenz in einem Wertebereich von  $-\pi$  bis  $+\pi$  anzeigen. Da die Phasendifferenz u.a. von der Geländehöhe abhängt und diese nachbildet ähneln sie visuell Höhenlinien. Nach jedem Phasenzklus kommt es zu einem Phasensprung durch den Beginn eines neuen Wellenabschnitts. Dieser wird von einem ausreichend großen Höhenunterschied zwischen zwei benachbarten Pixeln verursacht. Die praktische Schwierigkeit besteht darin die mehrdeutigen Phasenmessungen, von  $-\pi$  bis  $+\pi$  (bei unbekannter Anzahl der Wellenberge) in eindeutige Laufzeitdifferenzen zu überführen. Dieser Vorgang wird als Phase unwrapping bezeichnet und wird u.a. von GOLDSTEIN (1988), GHIGLIA & ROMERO (1994) oder MADSEN (1995) im Detail beschrieben. Prinzipiell werden dabei durch

Hinzufügen ganzzahliger Vielfache an die Phasenmessung eine eindeutige Laufzeit und somit ein gradueller Übergang anstelle vieler Phasensprünge hergestellt (siehe Abbildung 3.6.2 & Abbildung 3.6.3) (Interferogram to Phase unwrapping).

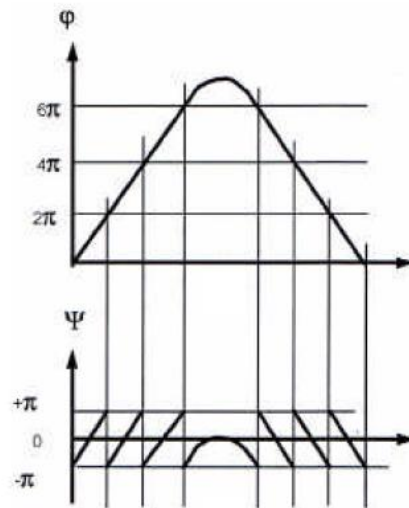


Abbildung 3.6.2: Prinzip des Phase unwrapping Quelle: SANTITAMNONT 1998

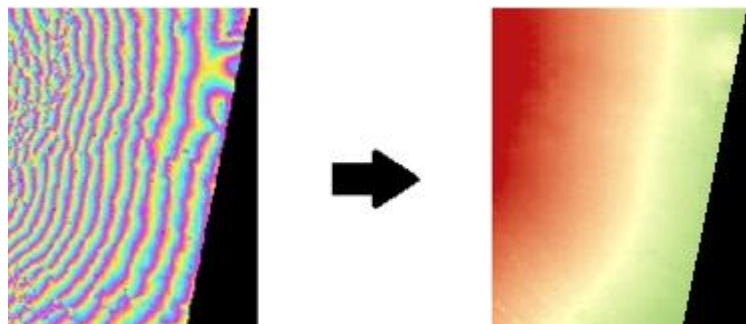


Abbildung 3.6.3: Von der wrapped phase (links) zur unwrapped phase (rechts)

Quelle: eigene Darstellung

Das Ergebnis wird unwrapped Phase bezeichnet und beinhaltet einen durchgehenden Phasenverlauf im gesamten Bild. Allerdings fehlen dieser Art relative Höhenwerte noch absolute Höhenwerte. Dafür werden Ground Control Points genutzt um aus punktuellen sekundären Höheninformationen einen durchgehenden Phasenverlauf mit absoluten Höhenwerten zu berechnen (Phase to height conversion).

### 3.6.2 Ergebnisse

Das Ergebnis der DEM Erstellung durch TerraSAR-X *repeat pass* Interferometrie ist in Abbildung 3.6.4 A dargestellt. Zu sehen ist ein lückenhaftes DEM. Aufgrund der z.T. steilen Regionen mit starker Erosion, bzw. Vegetationsbedeckten Regionen kam es zur zeitlichen Dekorrelation der Rückstreuer sodass eine Interferometrische Auswertung der SAR-Aufnahmen regional nicht möglich war. Dies wird bei einem Vergleich der Abbildungen 3.6.4 A und B deutlich, wo zu erkennen ist, dass nur für Regionen mit hoher Kohärenz ein Höhenwert ermittelt werden konnte.

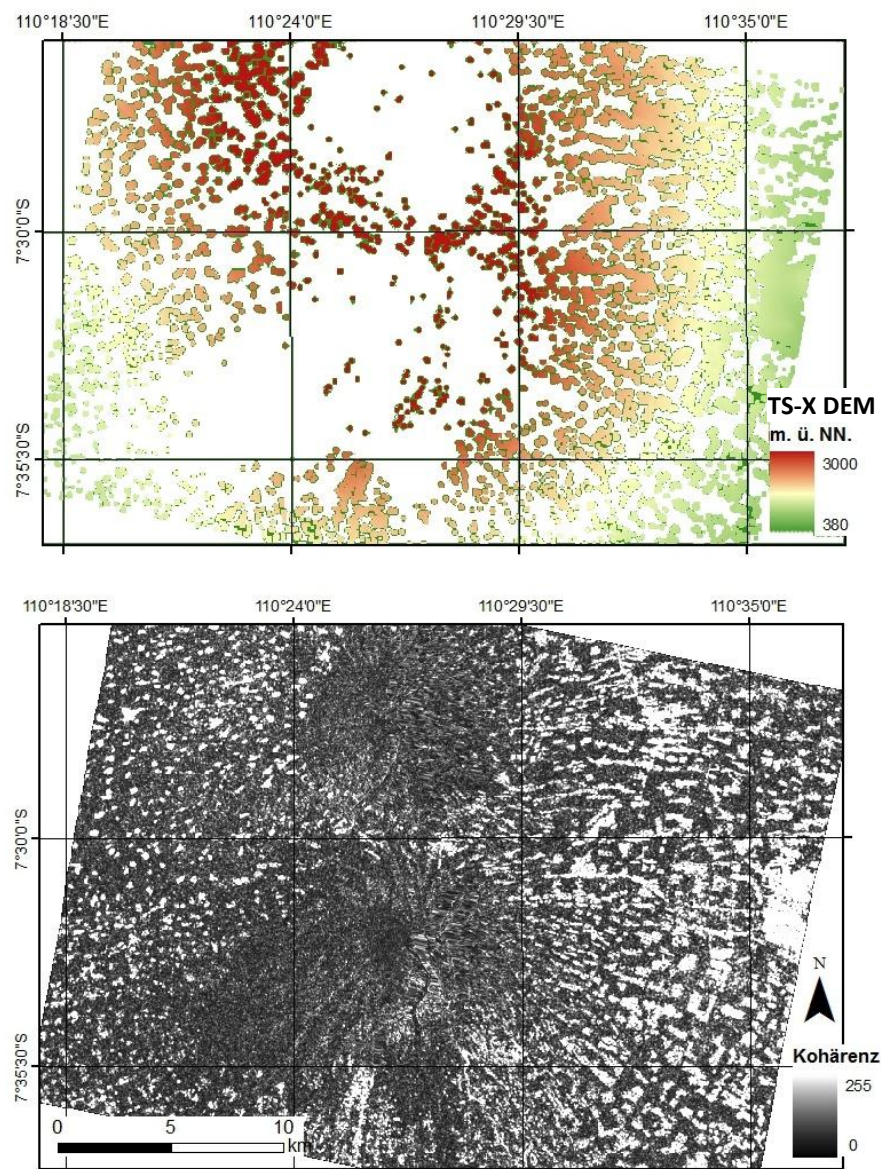


Abbildung 3.6.4: TerraSAR-X DEM (A), Kohärenz 26.10.2010 & 6.11.2010 (B)

Quelle: eigene Darstellung





## 4. Fazit

In dieser Arbeit wurden verschiedene Methoden der TerraSAR-X- gestützten Pre- und Post-Desaster Analyse zur Abschätzung vulkanbedingter Landbedeckungsveränderungen aufgezeigt. In diesem Abschnitt sollen nun die Vor- und Nachteile von TerraSAR-X zur Pre- und Post- Desaster- Analyse zur Abschätzung vulkanbedingter Landbedeckungsveränderungen im Hinblick auf das Krisenmanagement von Vulkanausbrüchen erörtert werden. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Technologien zur Unterstützung des Krisenmanagements von Vulkanausbrüchen gegeben.

### *Veränderungsdetektion*

Von den in dieser Arbeit verwendeten Veränderungsdetektionsmethoden (Zeitreihe, Differenz, Ratio, Interferometric Signature) liefert der Differenz- und der Interferometric Signature- Ansatz die deutlichsten multitemporalen RGB- Komposite (siehe Kapitel 3.1). Zwar stellte der Differenz Ansatz ein deutliches RGB Komposit her, doch für die Klassifikation erwies sich der NCI- Ratio als besser geeignet. Zu den multitemporalen RGB- Kompositen ist zu sagen, dass der Differenzansatz sich besonders gut eignet um Surge und Block & Ascheablagerungen visuell zu erkennen, während die Darstellung als Interferometric Signature neben dem Veränderungsbereich auch Landbedeckungsinformationen anzeigt. Da diese Darstellung ähnlich der eines Farbluftbildes ist, erleichtert sie die visuelle Bildinterpretation. Der Nachteil der Darstellung als Interferometric Signature ist der relativ hohe Zeitaufwand bei der Vorprozessierung (Orthorektifizierung, Kohärenzberechnung). Es erscheint daher sinnvoll, im zeitkritischen Fall einer Krise, zuerst ein RGB-Komposit vom Differenztyp mit EEC Daten zu produzieren und anschließend ein RGB-Komposit des Typ Interferometric Signature aus SSC Daten zu generieren.

### *Bildinterpretation*

Die Bildinterpretation ermöglicht eine Identifizierung sowie Unterscheidung von Block- & Aschestrom und Surge. Dabei zeigt das SpotLight Bildpaar (4.11.2010 & 15.11.2010) die von WADGE et al. (2011) in seiner Studie beobachteten Helligkeitsveränderungen nach pyroklastischen Strömen. Für das StripMap Bildpaar (26.10.2010 & 6.11.2010) zeigte sich

ein anderes Muster der Helligkeitsveränderung. Dieser Unterschied kann prinzipiell objekt- oder systemspezifisch verursacht sein. Mögliche Ursachen könnten z.B. ein anderes (vulkanologisches) Phänomen auf der abgebildeten Erdoberfläche (objektspezifische) oder die geringere räumliche Auflösung des StripMap Modus sein (systemspezifisch).

Während die pyroklastischen Stromablagerungen am Kali Gendol als solche durch Bildinterpretation identifiziert werden konnten (siehe Kapitel 3.2), war es an anderen Bereichen mit einer angezeigten Helligkeitsveränderung nicht zweifelsfrei möglich die Ursache für die Veränderung zu identifizieren. Daher sind ein Ortsvergleich, bzw. Metainformationen (z.B. von vulkanologischen Diensten, Presse) zur Unterstützung der Bildinterpretation notwendig, um belastbare Aussagen über Landoberflächenveränderungen treffen zu können. Im Krisenfall ist aus zeitlichen Gründen der Ortsvergleich nicht möglich, sodass Metainformationen eine bedeutende Rolle einnehmen.

### *Klassifikation der Gefahrenaussdehnung*

Kapitel 3.3 zeigt, dass es möglich ist, die Gefahrenaussdehnung ausgehend von TerraSAR-X Aufnahmen semiautomatisch zu klassifizieren. Die Genauigkeitsabschätzung des klassifizierten Gefahrenbereichs mit optischen Daten des WorldView Sensors ergibt einen Genauigkeit von 72,3 %. Dieser relativ niedrige Wert kann durch die Surge Ablagerungen erklärt werden. Während die Aschebedeckung, die durch den Surge verursacht wurde, in der optischen Aufnahme deutlich als graue Bereiche erkennbar sind, ist dieser Randbereich der Gefahrenzone mit TerraSAR-X zwar als Bereiche mit positiver Helligkeitsänderung erkennbar, besitzt aber keine scharfe Grenze. Dort findet sich anstelle einer scharfen Grenze ein gradueller Übergang, der insbesondere bei der Klassifikation Schwierigkeiten bereitet. Im Gegensatz zu den Surge Ablagerungen konnten die Block & Ascheablagerungen mit einer hohen Genauigkeit aus den TerraSAR-X Aufnahmen extrahiert werden. Ursache dafür ist sowohl die große Helligkeitsänderung zwischen Pre- und Post- Disaster- Aufnahme als auch die deutlich andere Reflektionseigenschaft dieser Oberfläche im Vergleich zu dessen Umgebung. Somit

konnte zumindest der Gefahrenbereich, ausgehend von den Block & Ascheablagerungen, mit hoher Genauigkeit extrahiert werden.

Ein Vorteil des in dieser Arbeit verwendeten objektbasierten Klassifikations-Ansatzes im Vergleich zu traditionellen pixelbasierten Klassifikationen liegt u.a. in der Vermeidung von Mischpixeln, die aufgrund des Speckle häufig auftreten würden und der Nutzung topologischer Informationen.

Die semiautomatische Klassifikation ist nur teilweise auf andere SAR- Aufnahmen übertragbar und subjektiv beeinflusst. Trotzdem eignet sie sich zur Erstellung von Kriseninformationen, da sie einfach anzuwenden ist und schnelle Ergebnisse liefert.

### *Schadensabschätzung*

Die Schadensabschätzung ermöglicht es, den Schaden mittels GIS- Analyse abzuschätzen. Die Vor- und Nachteile bei der Verwendung von Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsinformationen zeigt Abbildung 5.2.1. Während Landnutzungsdaten bereits eine Klassifikation darstellen, müssen diese aus Fernerkundungsdaten erst extrahiert werden. Dies bedeutet, dass Landnutzungsdaten eine schnellere, präzisere und verlässlichere Schadenseinschätzung ermöglichen. So wird ein Scheunendach bspw. auf einem Satellitenbild als Siedlungsfläche klassifiziert, während es in Landnutzungsdaten als landwirtschaftliche Fläche deklariert ist. Allerdings sind offizielle Landnutzungsdaten in den Kriseninformationszentren oft nicht verfügbar. Daher bietet sich die Nutzung von Fernerkundungs-basierten Landbedeckungsklassifikationen als Alternative an. Diese haben aber eine z.T. grobe Klasseneinteilung und benötigen einen hohen Zeitaufwand bei der (Vor-) Prozessierung. Eine Vergrößerung des Bestands an Landnutzungsdaten in Kriseninformationszentren wäre daher erstrebenswert.

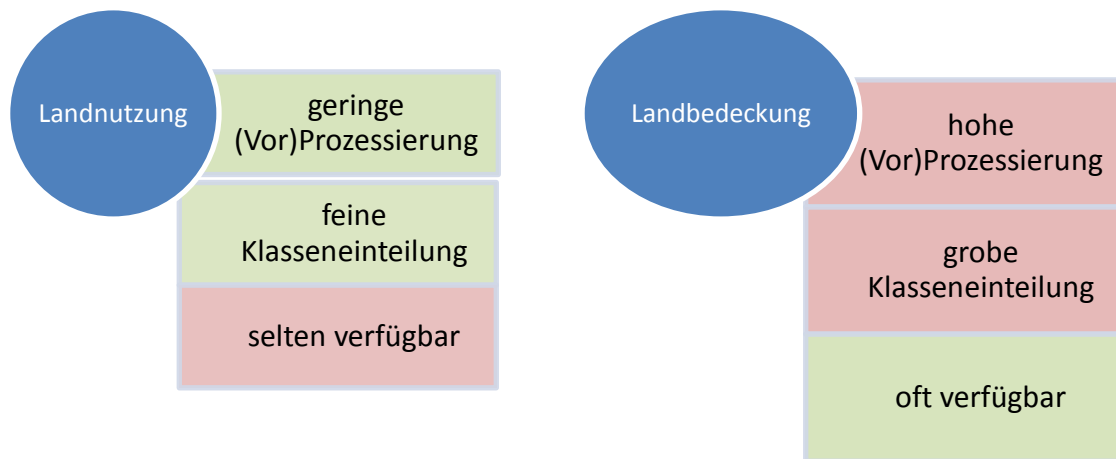


Abbildung 5.2.1: Pro- & Contra- Landnutzung/Landbedeckung Quelle: eigene Darstellung

### *Radarschattenanalyse*

Mit der Radarschattenanalyse ist es in dieser Arbeit möglich gewesen, Veränderungen der Talhöhe und somit die Mächtigkeit der zwischenzeitlich abgelagerten Sedimente zu messen. Die hier verwendete Methode gilt aber nur für ausreichend breite und ebene Talböden. Außerdem gilt sie nur für Täler, deren Verlauf annähernd parallel zum Azimuth ist. Trotz dieser Einschränkungen lieferte die Radarschattenanalyse Aussagen über topographische Veränderungen welche z.B. die Lageeinschätzung für einen potentiellen Wiederaufbau unterstützen könnten.

### *Interferometrie*

Mittels SAR- Interferometrie war es in dieser Arbeit nicht möglich flächenhafte topographische Informationen zu erhalten. Höheninformationen konnten nur lokal in Gebieten mit ausreichend hoher Kohärenz berechnet werden. Als Hauptursache ist sehr wahrscheinlich die zeitliche Dekorrelation für die geringe Kohärenz verantwortlich.

### *Zusammenfassung*

In dieser Arbeit wurden Möglichkeiten gezeigt, wie SAR- Fernerkundungsdaten das Krisenmanagement von Vulkanausbrüchen durch Extraktion von Kriseninformation unterstützen kann. Diese umfassten Veränderungsdetektion, Bildinterpretation, Klassifikation der Gefahrenausdehnung, Schadensabschätzung, Radarschattenanalyse und eine interferometrische Analyse. Der große Vorteil bei all diesen Methoden, besonders im Kontext der Kriseninformation, ist die Allwetter, Tag & Nacht Einsetzbarkeit der SAR-



Fernerkundung. Ein Nachteil ist die geringere Genauigkeit in der Detektion von Surge Ablagerungen im Vergleich zu sehr hoch auflösenden optischen, bzw. thermalen Sensoren.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die SAR- basierte Fernerkundung gut geeignet ist, um Kriseninformationen bezüglich Vulkanausbrüchen zu liefern.

Um die Genauigkeit bei der Detektion von Surge Ablagerungen zu verbessern, wäre es sinnvoll die hier verwendeten Prozesse der Objekt-basierten Klassifikation zu optimieren, bzw. durch weitere Informationen (DEM, Topographische Karten etc.) zu erweitern. Neben einer verbesserten Klassifikation ist es vorstellbar, dass eine Fusion von optischen- & SAR- Bilddaten aussagekräftigere Ergebnisse bzgl. der Veränderungsdetektion bzw. Bildinterpretation liefert. Weiterhin ist bereits absehbar, dass es durch monostatische SAR- Aufnahmekonfigurationen (z.B. TanDEM-X Mission) möglich sein wird, auch für Regionen wie dem Merapi, hochauflösende Geländemodelle zu erstellen. Solche sind unter anderem für die Risikoeinschätzung von großer Bedeutung. Gleichzeitig sind durch monostatische SAR- Aufnahmekonfigurationen auch die Methoden der Kohärenz- Veränderungsdetektion, aufgrund geringer zeitlicher Dekorrelation, vielversprechend. Im Hinblick auf verfügbare Pre- Disaster Szenen ist zu sagen, dass die Datenbasis kontinuierlich wächst, sodass in Zukunft auf eine umfangreiche Sammlung archivierter SAR- Bilddaten zurückgegriffen werden kann. Diese vergrößerte Datenbasis ermöglicht dann für viele potentiell gefährdete Vulkangebiete eine Veränderungsdetektion im Krisenfall.

## 5. Quellenverzeichnis

### 5.1 Literatur

- ALBERTZ, J. (2009): Einführung in die Fernerkundung. 4. Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- ALBERTZ, J., WIGGENHAGEN, M. (2009): Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. 5te Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg
- BAATZ, M., HOFFMANN, C., WILLHAUCK, G. (2008): Progressing from object-based to object-oriented image analysis. In: Object-Based Image Analysis – Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications. S.: 29 – 43, Springer Verlag, Berlin
- BAMLER, R. & SCHÄTTLER, B. (1993): SAR data acquisition and image formation. In Schreier, G.: SAR geocoding Data and Systems, Wichmann-Verlag, Karlsruhe
- BENZ, U. C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I, HEYNEN, M. (2004): Multi- resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.: 58, S. 239 – 258
- BIGNAMI, C., STRAMONDO, S., WEGMÜLLER, U. (2011): Synthetic Aperture Radar Monitoring of Merapi Volcano 2010 eruption. Geophysical Research Abstracts, Konferenzbeitrag EGU 2011, Wien, Vol.: 13
- BOUDON, G., CAMUS, G., GOURGAUD, A., LAJOIE, J., 1993. The 1984 nue´e-ardeute deposits of Merapi volcano Central Java, Indonesia: stratigraphy, textural characteristics, and transport mechanisms. Bulletin of Volcanology, Vol.: 55, S.: 327–342
- BÜHLER, Y., KELLENBERGER, T. (2007): Development of processing chains for rapid mapping with satellite data. In: LI, J., ZLATANOVA, S., FABBRI, A. (Hrsg.): Geomatics Solutions for Disaster Management, Springer, Berlin, S. 49-60
- CAMPBELL, J. B. (1996): Introduction to Remote Sensing. Taylor & Francis, London

- DANKLMAYER, A., DÖRING, B. J., SCHWERDT, M. & CHANDRA, M. (2009): Assessment of atmospheric propagation effects in SAR images. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.: 47, Issue: 10, S.: 3507–3518.
- DUNKLEY, P. (1999): Volcanic hazards - Hazard, vulnerability and risk assesment. In: Earthwise Magazine, British Geological Survey, Natural Environment Research Council, Issue: 14, S. 4-5
- eCognition Inc. (2009): eCognition Developer 8 – Reference Book. Document Version 1.2.0, Definiens AG, München
- ELACHI, C. (1987): Introduction to the physics and techniques of remote sensing. John Wiley & Sons, New York
- ESCH, T. (2006): Automatisierte Analyse von Siedlungsflächen auf der Basis höchstauflösender Radardaten. Dissertation, Julius-Maximilians Universität, Würzburg
- FRITZ, T., EINEDER, M. (2010): TerraSAR-X Ground Segment. Basic Product Specification Document. TX-GS-DD-3302, Issue 1.7, DLR, Oberpfaffenhofen
- GÄHLER, M. (2009): Support disaster management with remote sensing. In: SCHIEWE, J., MICHEL, U. (Hrsg.): Geoinformatics paves the Highway to Digital Earth. GI- reports, Band 8, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Osnabrück, S.: 24-28
- GERTISSER, R., KELLER, J. (2003): Trace element and Sr, Nd, Pb and O isotope variations in medium-K and high-K volcanic rocks from Merapi volcano, Central Java, Indonesia: Evidence for the involvement of subducted sediments in Sunda arc magma genesis. Journal of Petrology, Vol.: 44, Issue: 3, S. 457-489
- GHIGLIA, D., C., ROMERO, L.A. (1994): Robust Two-dimensional weighted and Unweighted Phase Unwrapping that Uses fast Transforms and Iterative Methods, Journal Optical Society of America, Vol.: 11, Issue: 1, S.: 107 – 117

- GOLDSTEIN, R. M., ZEBKER, H. A., WERNER, C.L. (1988): Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping, Radio science, Vol.: 23, Issue: 4, S.: 713 – 720
- GOLDSTEIN, R. M., WERNER, C. L. (1998): Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters, Vol.: 25, Issue.: 21, S.: 4035–4038
- HARALICK, R. M., SHANMUGAM, K, DINSTEIN, I. (1973): Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.: 3, Issue: 6, S. 610-621
- HENDERSON F. M., LEWIS, A. J. (1998): Principles & Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing, 3<sup>rd</sup>. Edition, Vol.: 2, John Wiley & Sons, Inc., New York
- KERLE, N., JANSSEN, L.L.F., HUURNEMAN, G.C. (Hrsg.) (2004): Principles of Remote Sensing. An introductory textbook. 3. Auflage, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede
- JOYCE, K.E., BELLISS, S.E., SAMSONOV, S.V., MCNEILL, S.J., GLASSEY, P.J. (2009b): A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. Progress in Physical Geography, Vol.: 33, Issue 2, S.: 183-207
- JOYCE, K., WRIGHT, K., SAMSONOV, S., AMBROSIA, V. (2009a): Remote sensing and the disaster management cycle. In: Jedlovec, G. (2009): Advances in Geoscience and Remote Sensing, INTECH, S. 317-346
- LACROIX, A. (1904): La Montagne Pelée et ses eruptions. Masson, Paris, S.: 1 – 662
- LAPRADE, G. L., LEONARDO, E. S. (1969): Elevations from radar imagery. Photogrammetric Engineering. Vol.: 29, Issue 2, S. 366-371
- LEWIS, A. J., WATIE, W. P. (1973): Radar shadow frequency Photogrammetric Engineering. Vol.: 33, S. 189-796
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (2000): Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, New York, USA

- LÖFFLER, E., HONECKER, U., STABEL, E. (2005): Geographie und Fernerkundung. E. Schweizerbart science publishers, Stuttgart
- LOPES, A., NEZRY, E. TOUZI, E., LAUR, H. (1990): Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images. Proceedings of IGARSS' 90, Mai 1990, Vol.: 3 (Maryland: IGARSS), S.: 2409–2412.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZI, E., MORAN, E. (2004): Change detection techniques. International Journal of Remote Sensing, Taylor & Francis, Vol. 25, Issue: 12, S.: 2365 - 2407
- MADSEN, S.N., MARTIN, J.M., ZEBKER, H.A. (1995): Analysis and Evaluation of the NASA/JPL TOPSAR Across-track Interferometric SAR System, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol.: 33, Issue: 2, S.: 383 – 401
- MARTINIS, S. (2010): Automatic near real-time flood detection in high resolution X-band synthetic aperture radar satellite data using context-based classification on irregular graphs. Dissertation, Ludwig-Maximillan Universität, München
- MAS, J.- F. (1999): Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. International Journal of Remote Sensing, Vol. 20, Issue 1, S. 139-152
- MASSONNET, D., BRIOLE, P., ARNAUD, A. (1995): Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. Nature, Vol.: 375, S. 567 – 570
- MASSONNET, D., FEIGL, K. L. (1998): Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, Reviews of Geophysics, Vol.: 36, S. 441 - 500
- NASA (1986): Shuttle Imaging Radar-C Science Plan, JPL Publication 86-29, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, S. 137f
- NASA (1989): Instrument Panel Report. SAR: Synthetic Aperture Radar (Earth Observing System, Vol. IIF), Earth Science and Applications Division, NASA Headquarters, Washington, DC, 233f



- PACIFICI, F., DEL FRATE, F., SOLIMINI, C., EMERY, W. J. (2007): An innovative neural-net method to detect temporal changes in high-resolution optical satellite imagery. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol.: 45, No.: 9, S.: 2940-2952
- PRESS, F., SIEVER, R. (2003): Allgemeine Geologie – Einführung in das System Erde. Spektrum Akademischer Verlag, 3. Auflage, Heidelberg
- QUARANTELLI, E. L. (1997): Ten criteria for evaluating the management of community disasters. Disasters, Vol.: 21, Issue: 1, S.: 39-56
- RAFFLES, TS. (1817): The History of Java. Black, Parbury and Allen for John Murray, London, S.: 25 – 28
- RANEY, R. K. (1998): Radar fundamentals: Technical perspective. – In Henderson, F. M. & Lewis, A. J. (eds.): Manual of remote sensing: Principles and applications of imaging radar. – Third edition, John Wiley & Sons, New York, USA.
- RIGNOT, E. J. M., VAN ZYL, J. J. (1993): Change detection techniques for ERS 1 SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.: 31, Issue: 4, s.: 896 – 906
- ROWLAND, S.K., HARRIS, A.H.L., WOOSTER, M.J., AMELUNG, F., GARBEIL, H., WILSON, L., MOUGINIS-MARK, P.J. (2003): Volumetric characteristics of lava flows from interferometric radar and multispectral satellite data: the Fernandina and 1998 Cerro Azul eruptions in the western Galapagos. Bull. Volcanol. 65., 311-330
- SABINS, F. F., JR. (1997): Remote Sensing - Principles and Interpretation. 3 Auflage, W. H. Freeman Verlag, New York
- SALICHON, J., LECOZANNET, G., MODARESSI, H., HOSFORD, S., MISSOTTEN, R., MCMANUS, K., MARSH, S., PAGANINI, M., ISHIDA, C., PLAG, H.-P., LABRECQUE, J., DOBSON, C., QUICK, J., GIARDINI, D., TAKARA, K., FUKUOKA, H., CASAGLI, N., MARZOCCHI, W. (2007). IGOS Geohazards Theme Report. Technical Report BRGM/RP -55739- FR, BRGM, Orleans, Frankreich

- SANTITAMNONT, P. (1998): Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping, Dissertation, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Hannover
- SCHABER, G.G., ELACHI, C. FARR, T. (1980): Remote Sensing Data of SP Mountain and SP Lava Flow in North-Central Arizona, Remote Sensing of Environment, Vol.: 9, Issue: 2, S.: 149 - 170
- SCHMINCKE, H.-U. (2010): Vulkanismus, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- SCHMULLIUS, C.; WAGNER, W. (2000): SIBERIA – Kartierung borealer Wälder mit Radarfernerkundung. GR 52 (2000), S. 44-48
- SCHNEIDER, D., PALLISTER, J., GRISWOLD, J., WESSELS, R. (2011): The 2010 eruption of Merapi Volcano, Indonesia: Use of satellite remote sensing to support crisis response activities. Geophysical Research Abstracts, Konferenzbeitrag EGU 2011, Wien, Vol.: 13
- SCHEUCHL, B., KOUDOGBO, F., PETRAT, L., PONCET, F. (2009): TerraSAR-X: Applications for Spaceborne High Resolution SAR Data. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasilien, S. 7457 – 7464
- SHERWIN, C.W., RUINA, J.P., RAWCLISSE, R.D. (1962): Some Early Developments in Synthetic Aperture Radar Systems, IRE Transactions on Military Electronics, MIL-Vol.:6, Issue:2, S. 111-115
- SIGURDSSON, H., CAREY, SN, ESPINDOLA, JM (1984): The 1982 eruptions of El Chichon Volcano, Mexico: stratigraphy of pyroclastic deposits. Journal of Volcanological and Geothermal Research Vol.: 23, S. 11-37
- SÖRGEL, U. (2008): Radar mit synthetischer Apertur. Vorlesungsskript, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität, Hannover

- SURONO, S., SOLIKHIN, A., BUDI SANTOSO, A., SUBANDRIYO, S. (2011): Merapi Crisis 2010: Declaring alert levels based on deformation and seismic data. Geophysical Research Abstracts, Konferenzbeitrag EGU 2011, Wien, Vol.: 13
- SURYO, I., CLARKE, M.C.G. (1985): The occurrence and mitigation of volcanic hazards in Indonesia as exemplified at the Mount Merapi, Mount Kelud and Mount Galunggung volcanoes. Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol.: 18, S.: 78 - 98
- TANGUY, J.- C., RIBIÈRE, CH., SCARTH, A., TJETJEP, W. S. (1998): Victims from volcanic eruptions: a revised database. Volcanological Bulletin, Springer Verlag, Vol.: 60, S.: 137 – 144
- TERUNUMA, T., NISHIDA, K., AMADA, T., MIZUYAMA, T., SATO, I., URAI, M. (2005): Detection of traces of pyroclastic flows and lahars with satellite synthetic aperture radars. International Journal of Remote Sensing, Vol.: 26, Issue: 9, S.: 1927 — 1942
- TILLING, R.I., LIPMANN P.W. (1993): Lessons in reducing volcano risk. Nature, Vol. 364, S.: 277 – 280
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. & FUNG, A. K. (1982): Microwave Remote Sensing: Active and passive. Vol. II – Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. – Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program, Reading, Massachusetts, USA.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. & FUNG, A. K. (1986): Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Vol. III – From theory to applications. – Artech House, Dedham, Massachusetts, USA
- VERBEEK, RDM. (1886): Krakatau. Imprimerie de l'Etat, Batavia, S.: 1 – 56
- VOIGT, S., KEMPER, T., RIEDLINGER, T., KIEFL, R., SCHOLTE, K., MEHL, H. (2007): Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, Issue: 6, S.: 1520-1528

- WADGE, G., COLE P., STINTON, A., KOMOROWSKI, J.-C., STEWART, R., TOOMBS, A.C., LEGENDRE, Y. (2011): Rapid topographic change measured by high-resolution satellite radar at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, 2008-2010. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Elsevier, Vol.: 199, S. 142 -152
- WADGE, G., HAYNES, M. (1998): Radar images growth of Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *International Journal of Remote Sensing* Vol.: 19, S. 797-800
- WADGE, G., SCHEUCHL, B., STEVENS, N. F. (2002): Spaceborn radar measurements of the eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat. In: DRUITT, T. H., KOKELAAR, B. P. (Hrsg.): *The eruption of Soufrier Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999*. Geological Society, London, Memoir 21, S. 583-594
- WEGMULLER, U., STROZZI, T., WIESMANN, A., WERNER, C. (1999): Land subsidence mapping with ERS Interferometr: Evaluation of maturity and operational readiness. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Int. Workshop on ERS SAR Interferometry Fringe '99*, Liège, Belgien
- WERNINGHAUS, R, BUCKREUSS, S. (2010): The TerraSAR-X Mission and System Design. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol.: 48, Issue: 2, S.: 606-614
- WYLIE, M., ARAGÓN ANGEL, A., BESSONE, N., CIAMBOTTINI, D., DOLDIRINA, C., FURUKAWA, Y., GUIM BERNAT, F., HOUNSLOW, L., NAVARATHINAM, N., OZAWA, S., PETERSON, L., RAGHAVENDRA, M. R., SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, A., BADIA SOLÉ, O., BLAKE, C., DIONNE, K., FAIED, D., GIOVANNINI, C., HENRY, H., LAPID, O., ÖZALP, E., PEER, A., PHAN, N., RICHARDS, L., SARKAR, S., SATHIYANATHAN, K., SILICANI, M., SORGENFREI, M., THALER, I., WEBB, J., WEI, Z., YU, L., SCHWEIGER, H., SMITHWICK, M., TARRAGÓ MUNTE, D., URBINA, D., WEBER-STEINHAUS, L., WRAY, J., YANAI, K., ZAERA-SANZ, M. (2008): *Volcanic Activity: Processing of Observation and Remote Sensing Data (VAPOR) – An Integrated Framework for Early Warning and Hazard Tracking of Volcanic Activity on Earth*. Final Report, International Space University, Straßburg, Frankreich
- ZEBKER, H.A., ROSEN, P., HENSLEY, S. MOUGINIS-MARK, P.J. (1996): Analysis of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii, using SIR-C radar correlation measurements. *Geology* 24, 495-498

ZSCHAU, J., WESTERHAUS, M., LÜHR, B.-G. (2004): Den Glutlawinen auf der Spur. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Magazin Forschung, S. 16-21



## 5.2 Web

### **AFP/GETTY IMAGES**

*Fotografie von Ulet Ifansasti (Titelbild):*

[http://www.boston.com/bigpicture/2010/11/mount\\_merapis\\_eruptions.html](http://www.boston.com/bigpicture/2010/11/mount_merapis_eruptions.html)

Zugriff am 12.4.2011

*Fotografie tote Kuh:*

[http://www.montserratvolcano.org/Merapi1\\_files/image002.jpg](http://www.montserratvolcano.org/Merapi1_files/image002.jpg) Zugriff am

12.4.2011

### **ANTARA Foto**

[http://us.en.vivanews.com/news/read/189990-indonesian-volcano-spews-more-](http://us.en.vivanews.com/news/read/189990-indonesian-volcano-spews-more-hot-clouds)

[hot-clouds](http://us.en.vivanews.com/news/read/189990-indonesian-volcano-spews-more-hot-clouds) Zugriff am 10.4.2011

### **ASI:**

Cosmo Sky med brochure: [http://www.telespazio.com/pdf/scheda\\_COSMO.pdf](http://www.telespazio.com/pdf/scheda_COSMO.pdf)

Zugriff am 12.4.2011

### **Australian National University**

TADJOEDDIN, M. Z., CHOWDHURY, A., MURSHED, S. M. (2010): Routine violence in the island of Java, Indonesia: Neo-Malthusian and social justice perspective. Australian National University, Seminar Paper, URL:

[www.crawford.anu.edu.au/acde/ip/pdf/lpem/2011/Zulfan\\_2011.pdf](http://www.crawford.anu.edu.au/acde/ip/pdf/lpem/2011/Zulfan_2011.pdf) Zugriff am

14.4.2011

### **BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana)**

URL: [http://rovicky.files.wordpress.com/2010/11/2010-11-](http://rovicky.files.wordpress.com/2010/11/2010-11-05_radius_20km_merapi.pdf)

[05\\_radius\\_20km\\_merapi.pdf](http://rovicky.files.wordpress.com/2010/11/2010-11-05_radius_20km_merapi.pdf) Zugriff am 12.4.2010

### **Center of Volcanological and geologic hazard mitigation.**

URL: <http://www.vsi.esdm.go.id/> Zugriff am 12.4.2011

### **Creaso Inc.**

The SAR- Guidebook. (2007) URL:

[http://www.ittvis.com/portals/0/pdfs/envi/SAR\\_Guidebook.pdf](http://www.ittvis.com/portals/0/pdfs/envi/SAR_Guidebook.pdf) Zugriff am

12.4.2011

**DLR**

*DLR* (2011): URL: [http://www.dlr.de/eo/desktopdefault.aspx/tabid-5750/9297\\_read-16016/](http://www.dlr.de/eo/desktopdefault.aspx/tabid-5750/9297_read-16016/) Zugriff am 12.4.2011

*Eoweb Datenportal*. URL: <https://centaurus.caf.dlr.de:8443/eoweb-ng/template/default/welcome/entryPage.vm> Zugriff am 12.4.2011

*ZKI*. URL: <http://www.zki.dlr.de/de> Zugriff am 12.4.2011

[www.dlr.de/eo/Portaldata/1/Resources/raumfahrt/weltraum/tsx\\_aufnahmemodi.jpg](http://www.dlr.de/eo/Portaldata/1/Resources/raumfahrt/weltraum/tsx_aufnahmemodi.jpg) Zugriff am 12.4.2010

**DPA**

<http://www.badische-zeitung.de/panorama/vulkan-merapi-kommt-nicht-zur-ruhe--37213364.html> Zugriff am 1.11.2010

**ESRI Inc.**

[http://webhelp.esri.com/arcgisDEsktop/9.3/index.cfm?TopicName=Cell\\_size\\_and\\_resampling\\_in\\_analysis](http://webhelp.esri.com/arcgisDEsktop/9.3/index.cfm?TopicName=Cell_size_and_resampling_in_analysis) Zugriff am 12.4.2011

**Infoterra**

<http://terrasar-x-archive.infoterra.de/> Zugriff am 12.4.2011

[http://www.infoterra.de/asset/cms/file/20100310\\_terrasar-x\\_i4\\_final.pdf](http://www.infoterra.de/asset/cms/file/20100310_terrasar-x_i4_final.pdf) Zugriff am 12.4.2011

**MIAVITA PROJECT**

JOUSSET, P. (2010): MIAVITA Note, Centennial Eruption at Merapi vulcano – October/November 2010. URL: <http://miavita.brgm.fr/Documents/MIAVITA-Merapi-eruption.pdf> Zugriff am 12.4.2011

**NASA**

Abbildung von Farr. URL: <http://history.nasa.gov/JPL-93-24/ch5.htm> Zugriff am 12.4.2011

ASTER Satellitenbild. URL:

[https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/user\\_community/data\\_in\\_action/eruption\\_at\\_mount\\_merapi\\_indonesia](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/user_community/data_in_action/eruption_at_mount_merapi_indonesia) Zugriff am 12.4.2011

### **Panoramino**

Fotografie von Soga Soegiarto, URL:

<http://www.panoramio.com/photo/45403711> Zugriff am 12.4.2010

Fotografie von Dr. Baiquni URL:

<http://oepenmindtravel00.blog.de/2010/11/17/rueckkehr-dorf-dorf-50-verschwunden-9988603/> Zugriff am 12.4.2010

### **SAFER**

DinSAR Deformation:

[http://safer.emergencyresponse.eu/site/docs\\_wsw/RUB\\_30/merapi\\_newsletter\\_safer\\_wp30200.pdf](http://safer.emergencyresponse.eu/site/docs_wsw/RUB_30/merapi_newsletter_safer_wp30200.pdf) Zugriff am 12.4.2011

### **SENTINEL ASIA:**

[https://sentinel.tksc.jaxa.jp/sentinel2/emobSelect.action?subset\\_name=Emergency Observation](https://sentinel.tksc.jaxa.jp/sentinel2/emobSelect.action?subset_name=Emergency%20Observation) Zugriff am 12.4.2011

### **Smithsonian institute volcanism Project**

<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=0603-25=&volpage=weekly#Oct2010> Zugriff am 12.4.2011

### **USGS**

Hazard Data Distribution Service <http://hdds.usgs.gov/hdds/> Zugriff am 12.4.2011

MYERS, B., BRANTLEY, S. R. (1995): Hazardous Phenomena at Volcanoes: USGS

Open-File Report 95-231 URL:

[http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/PyroFlows/description\\_pyro\\_flows.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/PyroFlows/description_pyro_flows.html)  
Zugriff am 12.4.2011

### 5.3 Andere Quellen

Gespräch mit Prof. em. Ulrich Scholz, Universität Gießen (Deutschland), am 15. Dezember 2010 im Institut für Geographie in Gießen

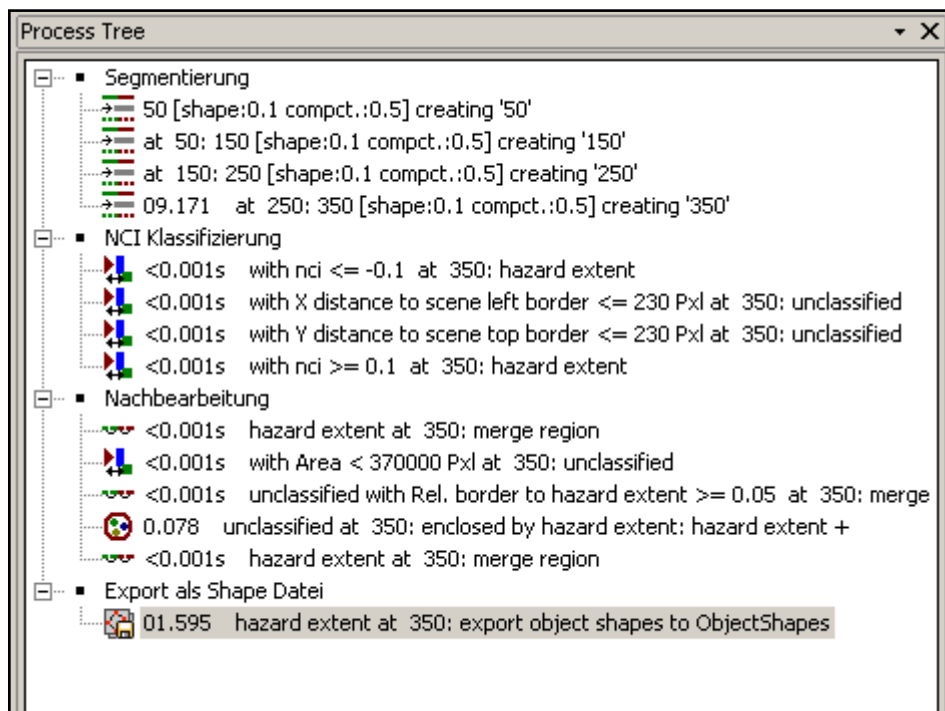
Gespräch mit Dr. Surono, Leiter des CVGHM in Bandung (Indonesien), am 4. April 2011 auf der EGU in Wien

Gespräch mit Dr. David Schneider, Mitarbeiter des USGS in Anchorage (USA), am 4. April 2011 auf der EGU in Wien

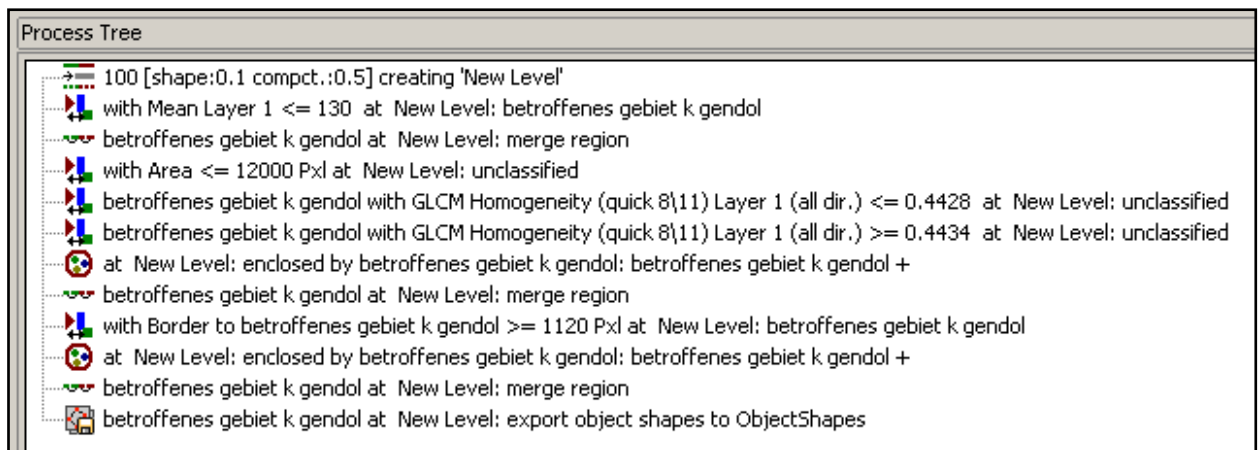
Gespräch mit Dr. Francois Beauducel, Mitarbeiter des Instituts für Geophysik in Paris (Frankreich), am 4. April 2011 auf der EGU in Wien

## 6. Anhang

### Prozessbäume der Klassifikationen

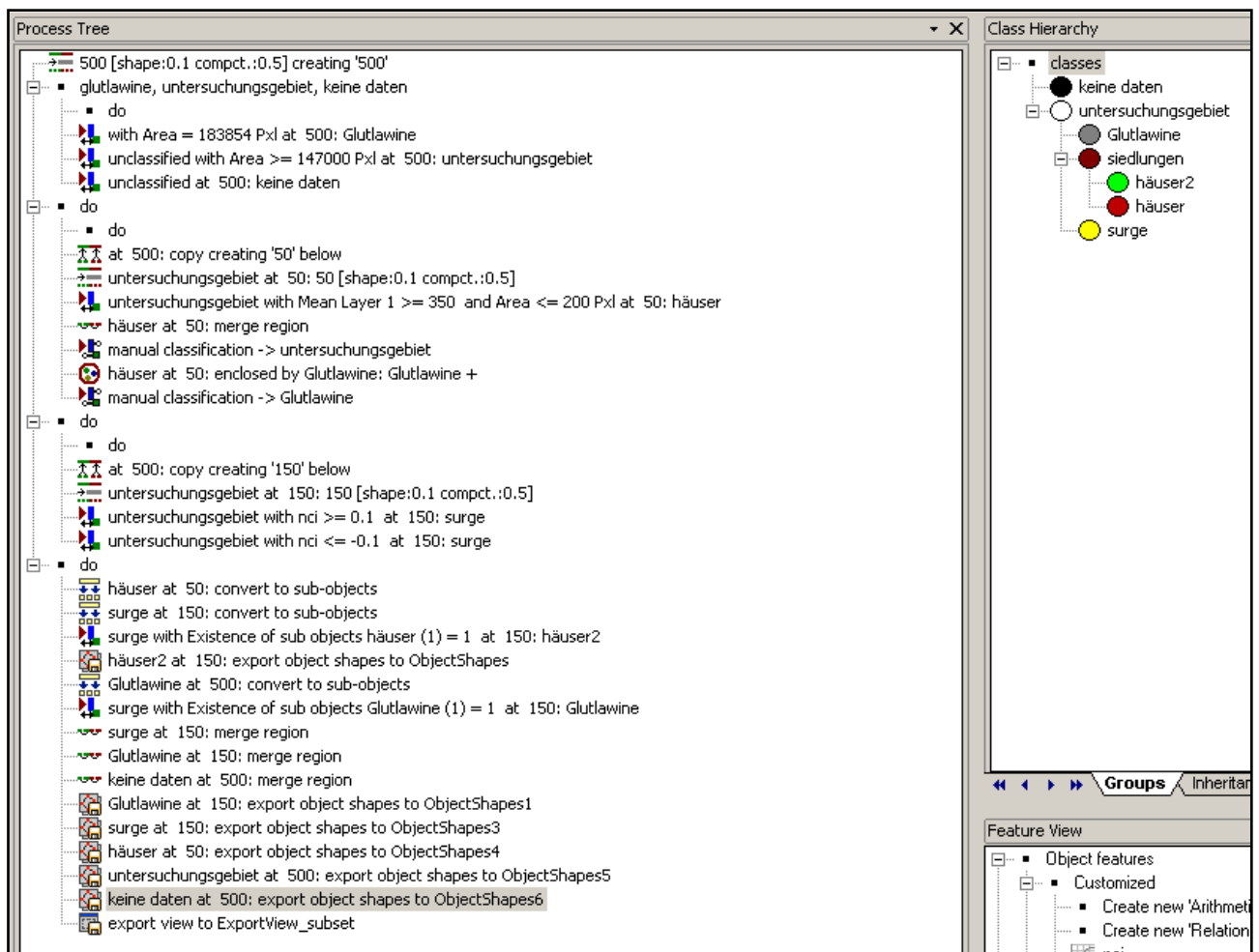


Prozessbaum der NCI basierten Klassifikation des StripMap Bildpaares vom 26.10.2010 & 6.11.2010

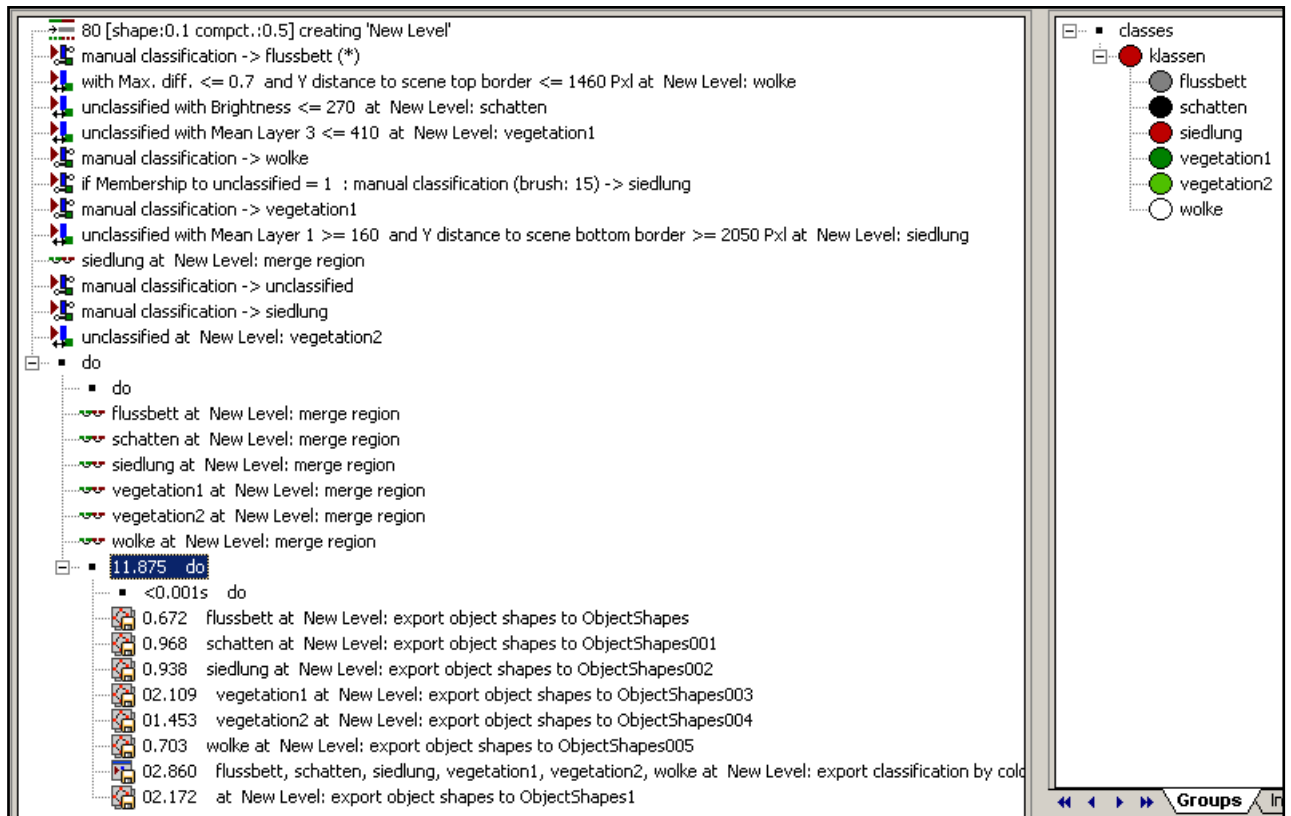


Prozessbaum der Textur basierten Klassifikation der StripMap Szene vom 6.11.2010





Prozessbaum der Klassifikation des SpotLight Bildpaares vom 4.11.2010 & 15.11.2010



Prozessbaum der Klassifikation der Kompsat Szene